CHAPITRE 1
CINEMATIQUE DU POINT

Pr. M. ABD-LEFDIL

Université Mohammed V-Agdal
Département de Physique
Faculté des Sciences -Rabat
Année Universitaire 2011-12
SVT

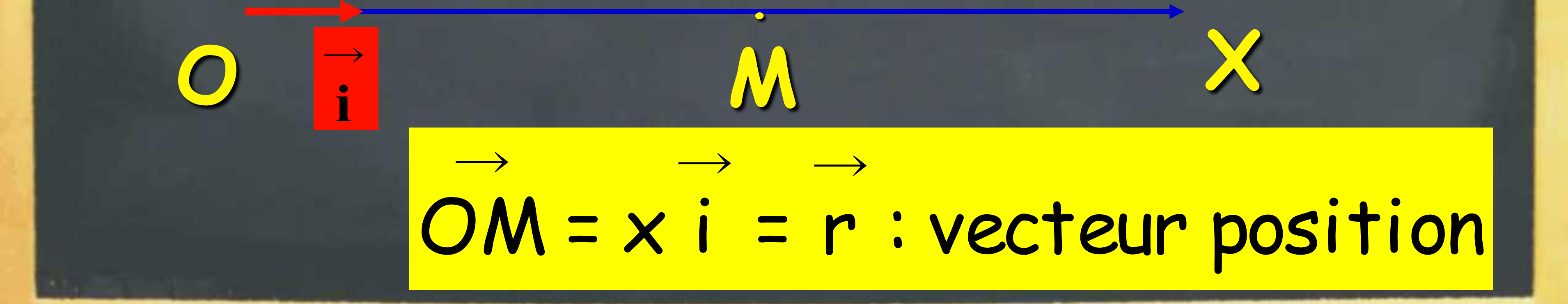
CINEMATIQUE ?

C'est la discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des corps, en faisant abstraction des causes du mouvement.

A-Rappels du mouvement unidimensionnel (mvt rectiligne)

Le mouvement d'un objet M est dit rectiligne si sa trajectoire est une droite.

On pourra alors repérer cet objet M, au cours du temps, par son abscisse par rapport à une origine O d'un axe OX.



Rappelons qu'un vecteur est constant si sa direction, son sens et son module sont tous constants

à t_1, l'objet M se trouve en M_1,
à t_2, l'objet M se trouve en M_2.

Durant l'intervalle de temps $[t_1,t_2]$, l'objet M s'est déplacé de M_1 vers M_2. On a:

$$\overrightarrow{OM_1} = x_1 \overrightarrow{i} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{OM_2} = x_2 \overrightarrow{i}$$

$$\overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1} = x_2 \overrightarrow{i} - x_1 \overrightarrow{i}$$

$$\Leftarrow \quad \overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1} = (x_2 - x_1)\overrightarrow{i} = \Delta x \overrightarrow{i}$$

$$\overrightarrow{M_1M_2} = \Delta x \, \vec{i}$$

Remarque: Ici le vecteur

$\vec{i}$ est constant.

Le vecteur vitesse moyenne est donné par:

$$\vec{V}_{moy} = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i}$$

Quant au vecteur vitesse instantanée, il est donné par:

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{V}_{moy} = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i}\right)$$

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) \vec{i} = \frac{dx}{dt}\vec{i}$$

$$\vec{V} = \frac{d}{dt}(x\vec{i}) = \frac{d}{dt}(\overrightarrow{OM})$$

Durant l'intervalle de temps $[t_1,t_2]$, La vitesse de l'objet M passe de V_1 à V_2. On a:

$$\vec{a}_{moy} = \frac{\vec{V}_2 - \vec{V}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}$$

$$(\Delta\vec{V} \,//\, \vec{a}_{moy})$$

Accélération moyenne:

$$\vec{a}_{moy} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}$$

$$(\Delta\vec{V} \; // \; \vec{a}_{moy})$$

Accélération instantanée:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta V_x}{\Delta t}\vec{i}$$

$$= \frac{dV_x}{dt}\vec{i}$$

$$= a_x\vec{i} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right) = \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}$$

- Si un mvt rectiligne se fait à vitesse constante, on dira qu'il est rectiligne et uniforme.

- Si un mvt rectiligne se fait à accélération constante, on dira qu'il est rectiligne et uniformément varié.

B-Mouvement bidimensionnel (ou plan)

Vecteurs à 2 Dimensions



Coordonnées cartésiennes (x,y)

$\vec{r} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} = \vec{OM}$: vecteur position

$\vec{r} = r\,\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}}$ x : abscisse et y : ordonnée

$r \equiv \left|\vec{r}\right| = \sqrt{\vec{r}\ \ \vec{r}} = \sqrt{x^2 + y^2}$

$\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}} = \dfrac{\vec{r}}{r} = \dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\,\vec{i} + \dfrac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\,\vec{j}$

$\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}}$ est un vecteur unitaire, alors $\vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{e}}_{\mathbf{r}} = 1$

Axe des y

M

y

$\mathbf{r}$

$\vec{\mathbf{j}}$

O

$\vec{\mathbf{i}}$

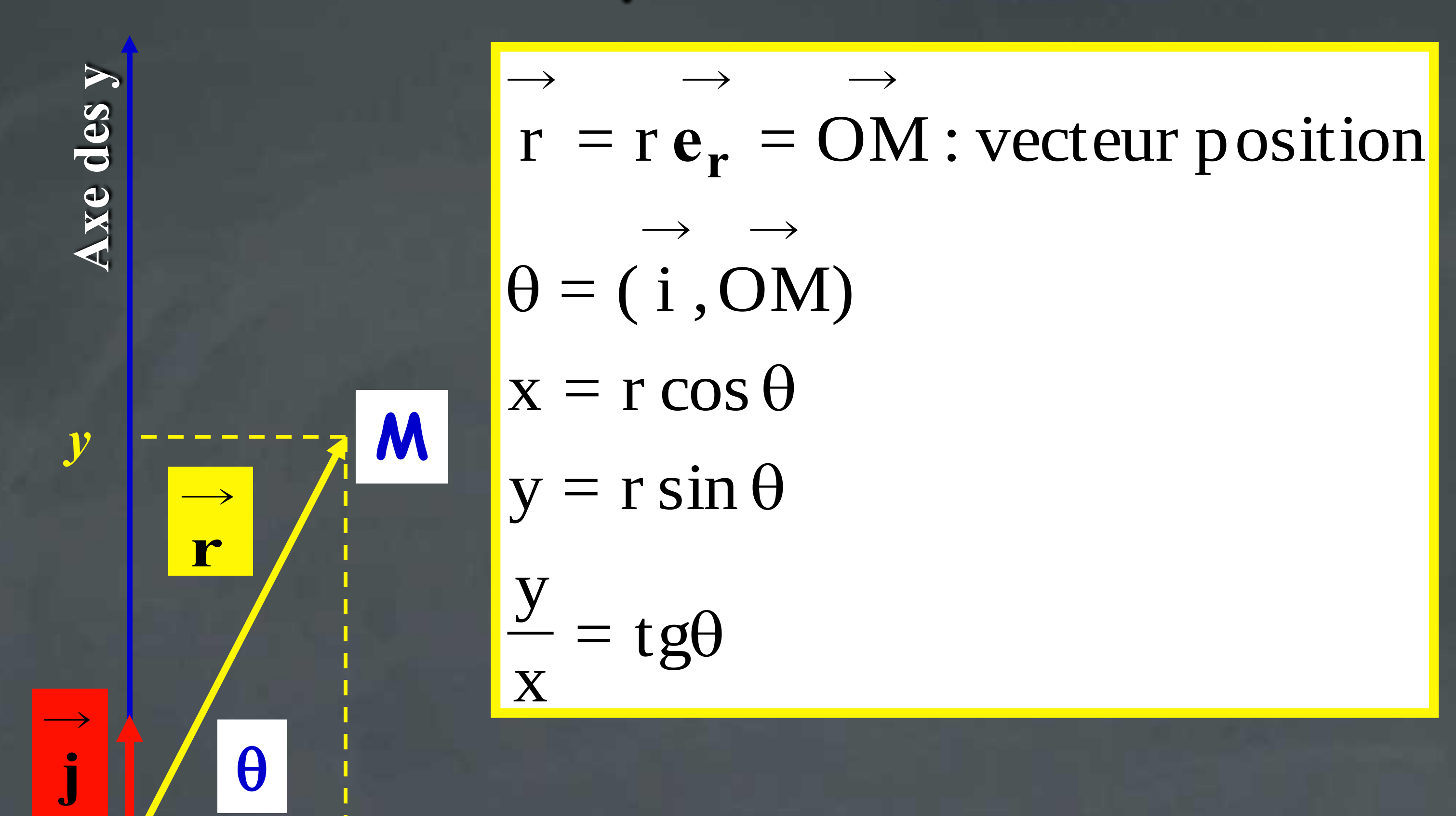
x

Axe des x

vecteurs unitaires le long des axes positifs x et y

$\vec{\mathbf{i}} \cdot \vec{\mathbf{i}} = \vec{\mathbf{j}} \cdot \vec{\mathbf{j}} = 1$ et $\vec{\mathbf{i}} \cdot \vec{\mathbf{j}} = 0$

Coordonnées polaires (r,θ)



$\vec{e_r}$ est un vecteur unitaire, alors $\vec{e_r}\ \vec{e_r} = 1$

son module est constant mais pas sa direction et son sens.

Vecteur Vitesse:

$$\overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{r_1} = x_1 \overrightarrow{i} + y_1 \overrightarrow{j}$$

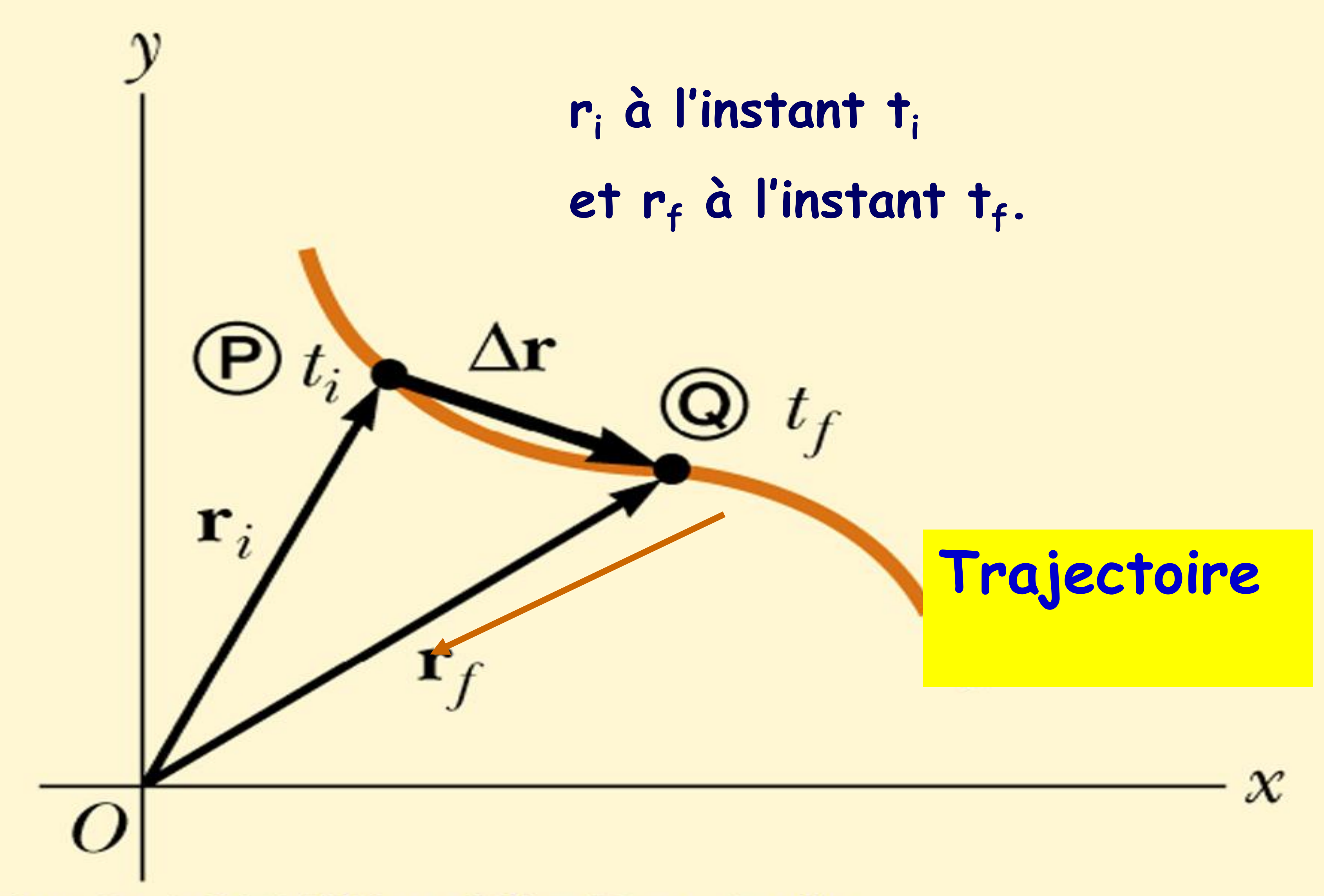
$$\overrightarrow{OM_2} = \overrightarrow{r_2} = x_2 \overrightarrow{i} + y_2 \overrightarrow{j}$$

$$\Delta \overrightarrow{r} = \overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{r_2} - \overrightarrow{r_1}$$

$$\Delta \overrightarrow{r} = (x_2 - x_1) \overrightarrow{i} + (y_2 - y_1) \overrightarrow{j}$$

$$= \Delta x \overrightarrow{i} + \Delta y \overrightarrow{j}$$

C'est le vecteur déplacement



r_i à l'instant t_i
et r_f à l'instant t_f.
y
P
t_i
Δr
Q
t_f
$\mathbf{r}_i$
$\mathbf{r}_f$
Trajectoire
O
x
© 2002 Brooks Cole Publishing - a division of Thomson Learning

On a : $\frac{\Delta \vec{i}}{\Delta t}$ et $\frac{\Delta \vec{j}}{\Delta t}$

Car les 2 vecteurs sont Constants.

$$\vec{V}_{moy} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\vec{j}$$

$$\vec{V}_{moy} = V_{moy_x}\vec{i} + V_{moy_y}\vec{j}$$

$$\lim_{\Delta t \to 0} \vec{V}_{moy} = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\vec{j}\right)$$

$$\vec{V} = \left(\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\vec{i} + \left(\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)\vec{j} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j}$$

$$\vec{V} = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} = \frac{d}{dt}(x\vec{i} + y\vec{j}) = \frac{d}{dt}(\overrightarrow{OM})$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta V_x}{\Delta t}\vec{i} + \frac{\Delta V_y}{\Delta t}\vec{j}$$

$$= \frac{dV_x}{dt}\vec{i} + \frac{dV_y}{dt}\vec{j}$$

V_x et V_y sont les composantes du vecteur vitesse.

$$\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} = \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dOM}{dt}\right) = \frac{d^2OM}{dt^2}$$

a_x et a_y sont les composantes du vecteur accélération.

Caractéristiques du mouvement bidimensionnel

- les mouvements suivant X et Y sont indépendants
- Ils peuvent être traités comme 2 problèmes séparés.

Le problème du mouvement plan se ramène à 2 problèmes de mouvements rectilignes simultanés.

- Pour connaitre la trajectoire (y en fonction de x)
  1. résoudre x(t) et y(t) appelées équations horaires.
  2. Substituer une Eq. pour avoir t en fonction de x
  3. Insérer t(x) dans y(t) pour avoir y(x) qu'on appele équation cartésienne du mvt.

CHAPITRE 2

DYNAMIQUE D'UN POINT

Pr. M. ABD-LEFDIL

Université Mohammed V-Agdal
Faculté des Sciences -Rabat
Département de Physique

Année Universitaire 2011-12

SVT

C'est la partie de la mécanique qui s'intéresse à l'étude des forces et de leurs effets sur le mouvement des objets.

Elle n'est pas applicable :

- Aux objets de taille microscopiques (< échelle atomique) : c'est le domaine de la **mécanique quantique.**

- Aux objets ayant une vitesse proche de celle de la lumière : c'est la **relativité d'Einstein.**

Référentiel d'inertie

- Un référentiel est un repère, généralement orthonormé, auquel on associe une horloge pour mesurer le temps.

Un référentiel d'inertie (appelé aussi galiléen) est un référentiel fixe ou en translation rectiligne uniforme par rapport au référentiel de Copernic (origine est le soleil) qui est pris comme étant un référentiel d'inertie de référence.

I- Lois de Newton

- **Première loi :**

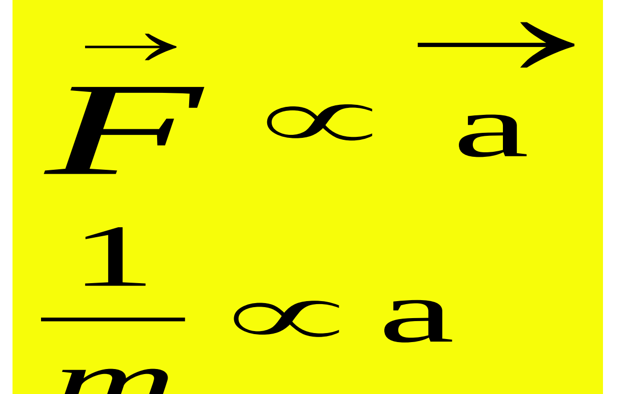
  Si aucune force n'agit sur un objet ou si la somme des forces (résultante des forces) est nulle, alors:

a- Un objet au repos reste au repos.

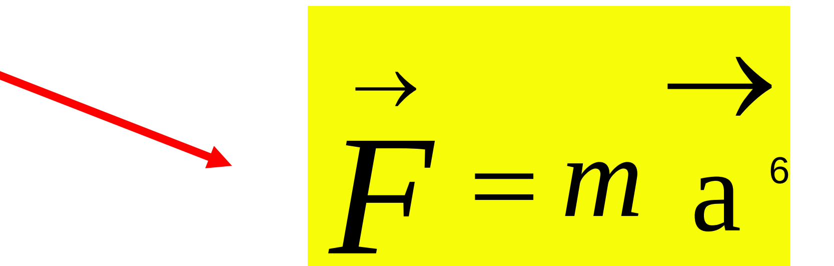
b- Un objet en mouvement continue à se mouvoir de manière rectiligne et uniforme (à vitesse constante).

Deuxième loi:

L'accélération d'un objet en mouvement est proportionnelle à la résultante des forces qui lui sont appliquées et inversement proportionnelle à sa masse. L'objet est accéléré dans la même direction que $\vec{F}$



D'où



Troisième loi :

Si un objet 1 exerce une force sur un second objet 2, le second objet exerce, sur le premier, une force égale mais opposée : C'est le principe de l'action et de la réaction.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Remarque: Les lois de Newton sont valables seulement dans un référentiel **dit référentiel d'inertie.**

II- Masse volumique et densité

1) Si un corps a une masse m et un volume V, sa masse volumique r est définie par:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{en} \quad kg/m^3$$

Exemples :

Eau (à 0°C et P = 1 atm) : ρ= 1000 kg m^{-3}

Hg (mercure) : ρ = 13600 kg m^{-3}

Sang (complet) : ρ = 1059.5 kg m^{-3}

2) La densité représente le rapport entre la masse volumique d'un corps donné et la masse volumique de l'eau à 0°C.

La densité est une grandeur sans dimension (c.a.d. sans unité).

Exemples :

d (Hg) = 13.6 ;

d(Al) = 2.7 ;

d(Au) = 19.3

III- Poids et poids effectif

1) Poids

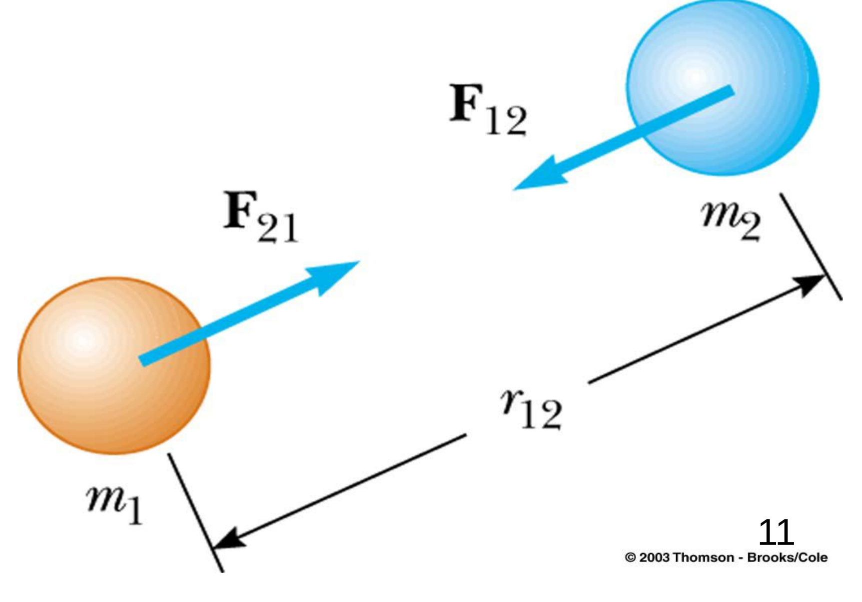
Le poids d'un objet représente la force exercée par la terre sur un objet. C'est ce qu'on appelle la force de gravitation.

Force de gravitation Universelle

- Force est toujours attractive
- Force est proportionelle aux masses
- Force est inversement proportionelle au carré de la distance qui les sépare.

$$F = G\frac{m_1 m_2}{{r_{12}}^2}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\left(\frac{m^3}{kg \cdot s^2}\right)$$



Si $m_2=M_T$ (la masse de la terre) et $m_1=m$ la masse de l'objet,

r est la distance qui sépare l'objet du centre de la terre.

$$r = R_T + h$$

R_T est le rayon de la terre (RT≈ 6400 km)

et h l'altitude (hauteur par rapport au sol)

$$F = G\frac{M_T m}{r^2}$$

A partir de la 2ème loi de Newton, l'accélération résultant de cette force est généralement notée g et elle est donnée par:

$$m\,a = F = m\,g_T \iff g_T = \frac{G\,M_T}{r^2}$$

On voit que g est indépendante de m.
Soit g_0 : accélération de la pesanteur pour $r = R_T$

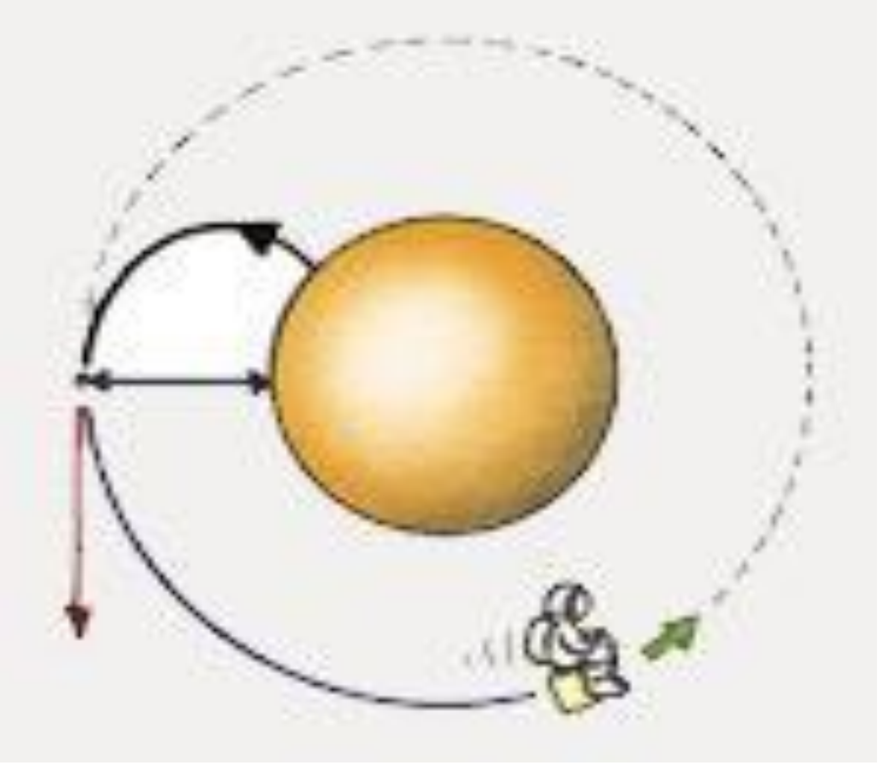
g_3 : accélération de la pesanteur à la hauteur h = 3 km.

$$\frac{g_1}{g_0} = \left[\frac{6400}{6403}\right]^2 \rightarrow 1$$

Vitesse de satellisation d'un objet

Il existe une vitesse en dessous de laquelle la satellisation n'est pas possible : le satellite retomberait ou brûlerait dans l'atmosphère.

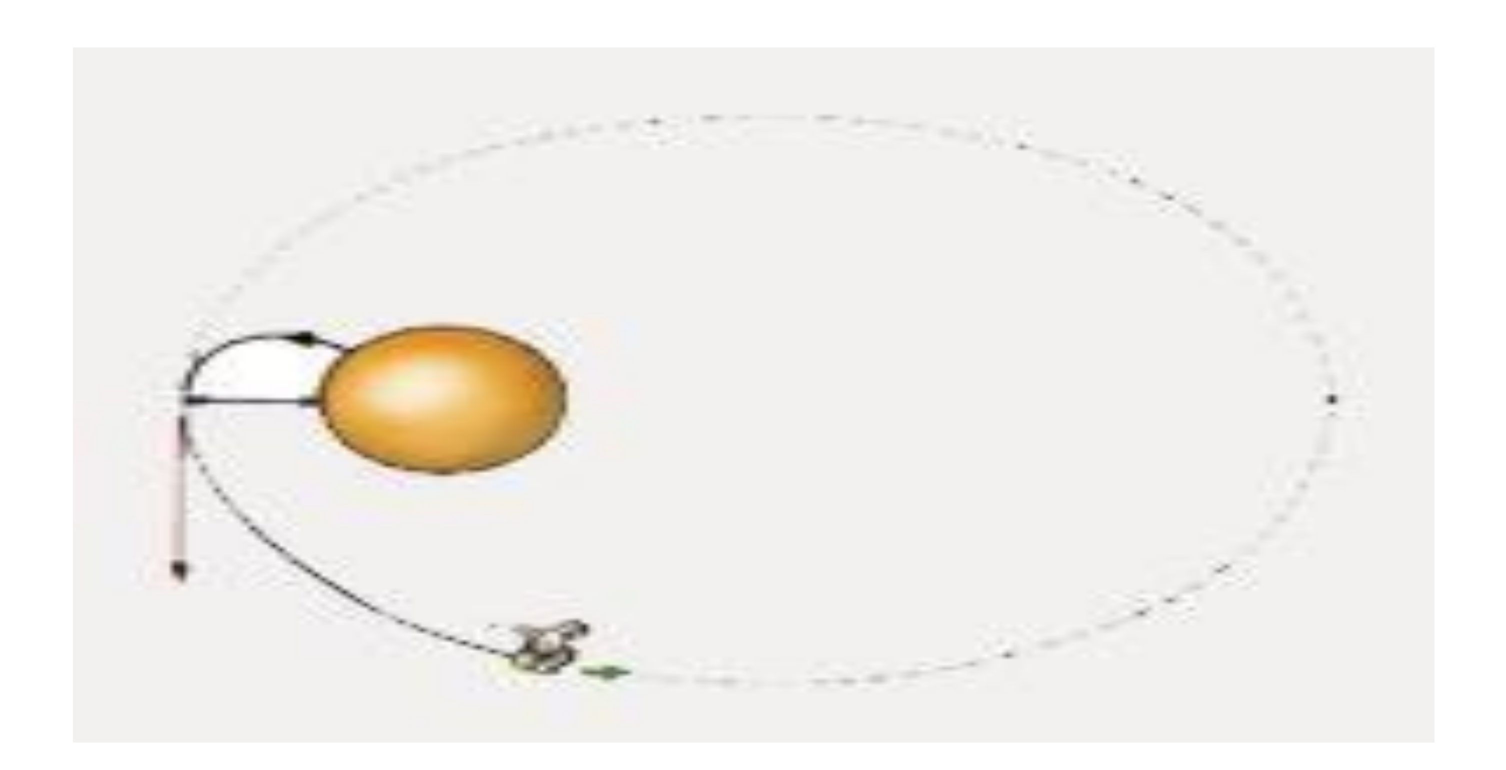
Cette vitesse est appelée **vitesse de satellisation circulaire**; l'orbite est alors un cercle. Sa valeur dépend de l'altitude au point d'injection.



$$F = m\frac{v^2}{r} = m\frac{G\,M_T}{r^2}$$

$$\Leftrightarrow \quad v_{satell..} = \sqrt{\frac{G\,M_T}{r}}$$

Si la vitesse est supérieure à cette valeur limite, l'orbite est alors une ellipse. Plus la vitesse croit, plus l'ellipse s'allonge. Dans le cas d'une orbite elliptique, on parle alors d'apogée (le point le plus éloigné de la Terre sur l'orbite) et de périgée (le point le plus proche).
La vitesse est inversement proportionnelle à l'altitude, elle est donc maximale au périgée et minimale à l'apogée.



Vitesse de libération d'un objet

La vitesse de libération de la Terre est définie comme la vitesse initiale qu'un corps doit posséder afin de pouvoir échapper à l'attraction gravitationnelle de notre planète.

Elle est d'environ 10 kilomètres par seconde. Ainsi, pour envoyer une sonde vers une autre planète, il est nécessaire de la lancer au moins avec cette vitesse. Sinon, l'engin ne peut pas s'échapper, soit il retombe sur Terre, soit il se retrouve en orbite autour de notre planète tel un satellite.

La vitesse minimale de lancement, ou vitesse de libération, est telle que :

$$v_{libér.} \geq \sqrt{\frac{G\,M_T}{r}}$$

Remarques

- La masse est une propriété intrinsèque alors que le poids dépend du lieu.
- **Sur la lune, l'accélération de la pesanteur g_L est de 1.67 ms^{-2}.**

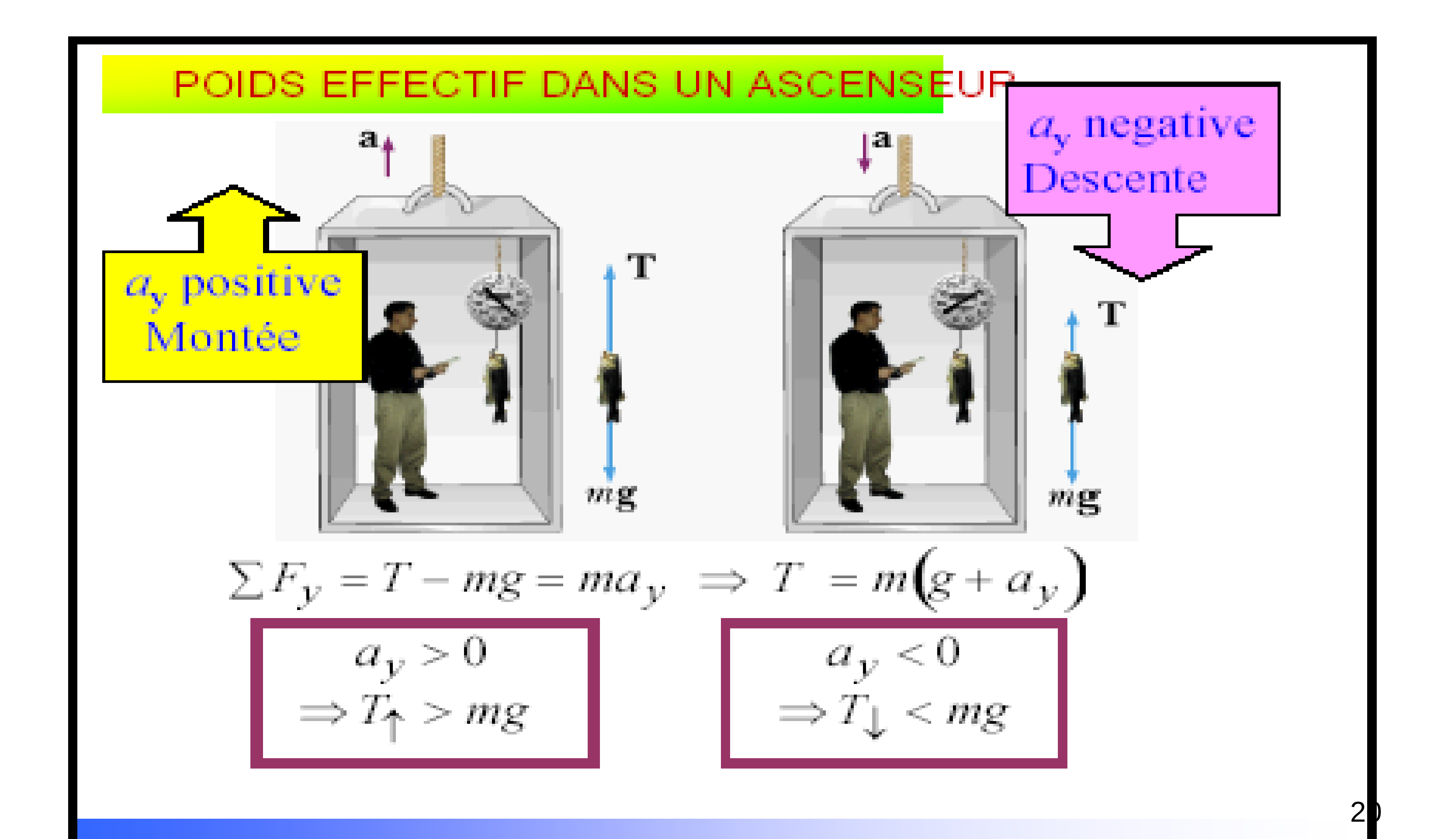
Par conséquent, le poids sur la lune sera approximativement six fois plus faible que le poids sur la terre. C'est pourquoi certaines molécules comme O_2 et N_2 arrivent à échapper à l'attraction lunaire (absence d'air sur la lune) car ils atteignent des vitesses supérieures à la vitesse de libération.

$$g_L = G\frac{M_L}{(R_L + h)^2}$$

2) Poids effectif

Pour bien comprendre cette notion de poids effectif, nous allons l'introduire à l'aide de deux exemples.

1)Poids effectif dans un ascenseur



2) Soit un tube contenant un liquide et dans lequel on place une suspension de particules.
Le poids apparent (poids effectif) des particules est:

P_{eff} = Poids – Poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est égale au poids du liquide déplacé.

$$P_{eff} = mg - V\,\rho' g = V\,(\rho - \rho')\,g$$

m est la masse d'une particule de volume V.

ρ est la masse volumique de la particule et ρ' la masse volumique du liquide.

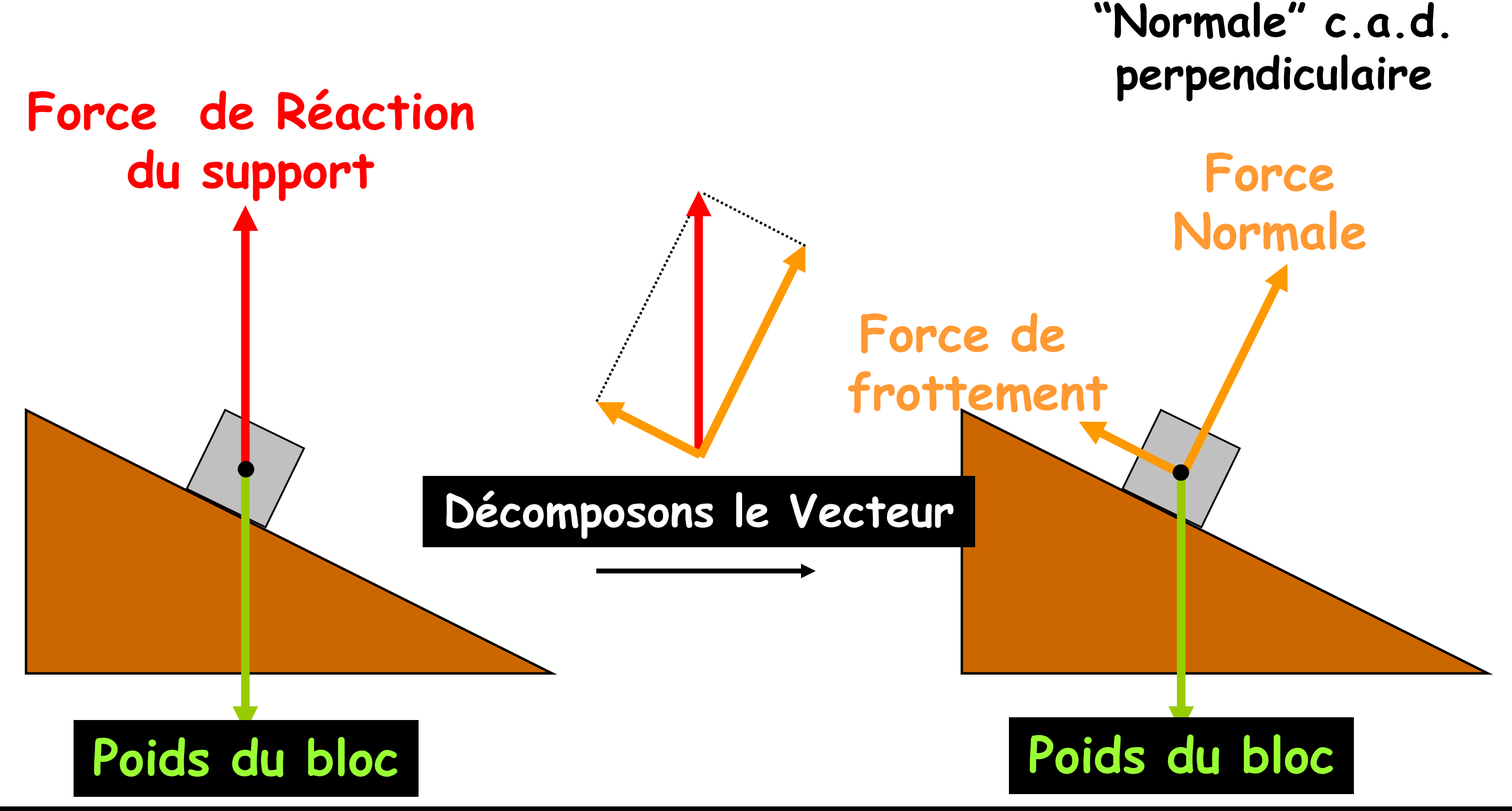
P_{eff} est une force verticale descendante si $(\rho - \rho')$ est positive
Elle peut être suffisante ou non pour la sédimentation.

IV- Frottement

Le frottement est une force qui s'oppose au mouvement.

- \- Direction parallèle à la surface,
- \- Pratiquement indépendente de la surface de contact,
- \- Le coefficient de fotement μ dépend de la nature de la surface en contact.

“Forces Normales et Forces de Frottement”



Force de Fottement = Force Normale × (coefficient de frottement)

$$F_{frottement} = \mu \cdot F_{normale} = \mu \cdot F_n = \mu \cdot n$$

Lubrifiants naturels

- le liquide synovial s'écoule à travers les cartilages qui tapissent les articulations.

Cartilage
menisci
Joint fluid

- la salive qui se mélange aux aliments lorsque nous mâchons.
- le mucus qui tapisse le cœur, les poumons et les intestins sert à minimiser les frottements associés au fonctionnement de ces organes.

Statique

- La statique concerne l'étude des forces qui s'exercent sur un objet en équilibre et au repos. C'est une partie très importante de la physique.
- Même en l'absence de mouvement, différents problèmes intéressants peuvent être résolus concernant les forces en présence.

Exemples:

Equilibre d'un pont, forces musculaires (voir TD 2)
Notre étude sera brève et axée sur un solide rigide. C'est un objet dont le volume, la forme et les dimensions ne varient pas lorsqu'il est soumis à des forces.

Conditions d'équilibre

Un solide rigide est en équilibre si:

1) la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle : c'est l'équilibre de translation.

$$\sum \vec{F}_{appl} = \vec{0}$$

2) Cependant, un solide peut se mettre à tourner si les forces appliquées donnent naissance à un moment résultant non nul.
Il faut que le moment résultant des forces appliquées soit nul :

$$\sum \vec{M}_0\,\vec{F}_{appl} = \vec{0}$$

C'est la seconde condition d'équilibre : L'absence de rotation. On rappelle que N est le point d'application de la force F

$$\vec{M}_O\vec{F} = \overrightarrow{ON} \wedge \vec{F}$$

CHAPITRE 3
MOUVEMENTS PARTICULIERS
A- Mouvement circulaire
B- Mouvement oscillatoire

Pr. M. ABD-LEFDIL
Université Mohammed V- Agdal
Département de Physique
Année universitaire 2011-12
SVI

A- MOUVEMENT CIRCULAIRE

Ses caractéristiques:

1- C'est un mouvement plan dont la trajectoire est un cercle.

2- Le module du vecteur position est constant et il est égal au rayon r du cercle.

3- Même à vitesse constante, l'accélération est non nulle car le vecteur vitesse change de direction.

4- La force nécessaire pour produire cette accélération sera donnée par la 2 ème loi de Newton.

Exemples de mouvements circulaires

a) La force électrostatique $F_{électr}$ entre deux charges q_1 et q_2 séparées par une distance r est donnée par:

$$F_{électr} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$



Définition de la force magnétique

Produit vectoriel

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

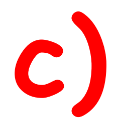
v × B

v

θ

B

$$F_{\text{mag}} = \left|\vec{\mathbf{F}}_{\text{mag}}\right| = q\left|\vec{\mathbf{v}}\right|\left|\vec{\mathbf{B}}\right|\sin\theta = qvB\sin\theta$$



$B_{\text{out of page}}$

E

x

Detector

Ion source



VOITURE DANS UN VIRAGE

L'accélération centripéte est due à la force de fottement entre les pneus et la chaussée.



I- Mouvement circulaire uniforme

. Lorsqu'on effectue une rotation complète, les vecteurs position et vitesse effectuent une rotation de 2π et tournent au même rythme. Par conséquent leurs taux de variations seront égaux.

A partir de la géométrie des 2 figures (triangles semblables)

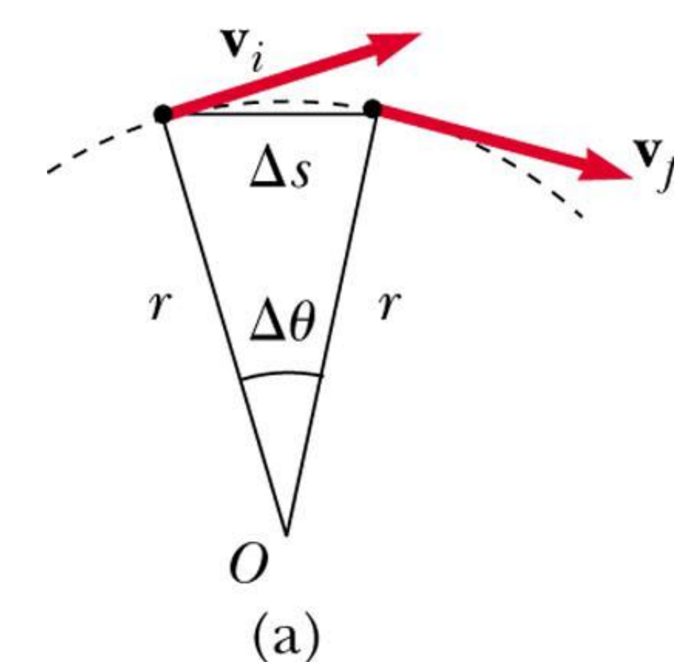
$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r}$$

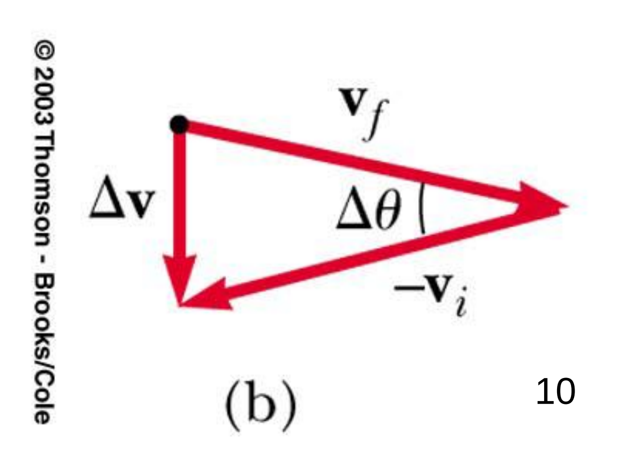
Or

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$ Et $$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



$$a = \frac{v^2}{r}$$

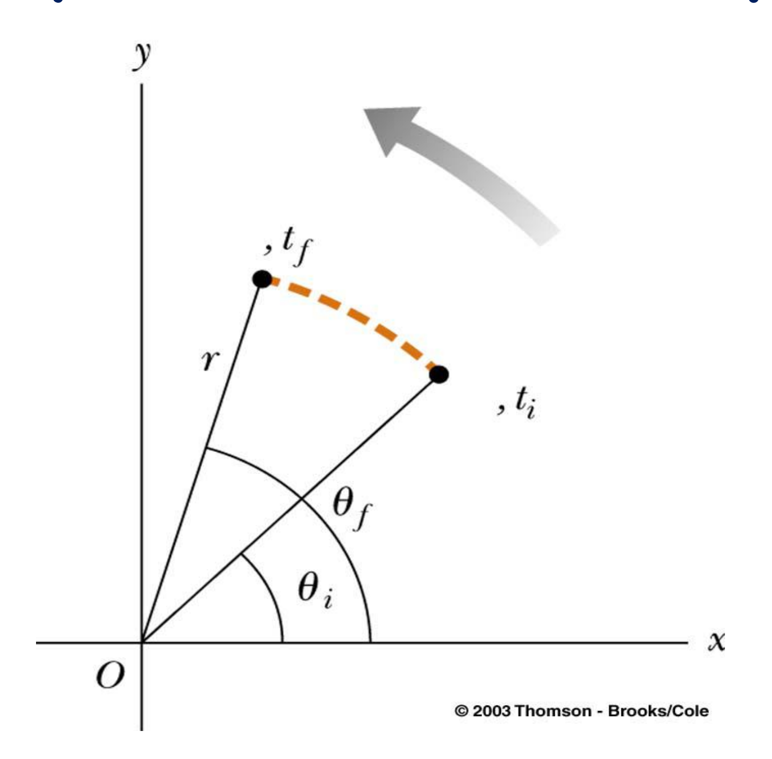


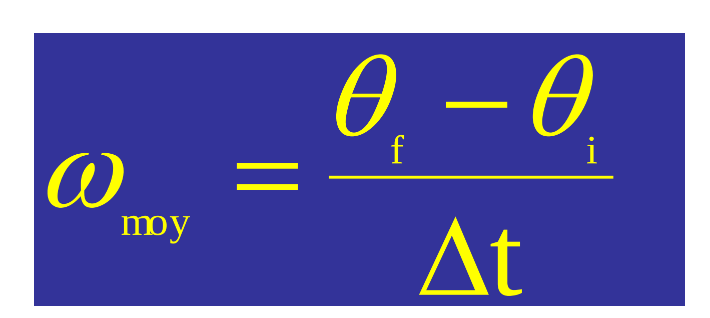


- **Vitesse angulaire ω:**

Elle est définie par le taux de variation de l'angle θ par rapport au temps.

Si l'angle q varie de $\Delta\theta$ ($\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$) entre t_i et t_f ($t_f - t_i = \Delta t$), alors la vitesse angulaire moyenne sera donnée par





$$\omega_{moy} = \frac{\theta_f - \theta_i}{\Delta t}$$

•Quant à la vitesse angulaire instantanée, elle est donnée par :

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \omega_{moy} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

La vitesse angulaire est une grandeur vectorielle: $\vec{\omega}$ est portée par l'axe de rotation Δ.

Son sens dépend de celui de la rotation.

Relation entre vitesse de rotation ω et v:

$$v = r\omega$$

$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j}$, $\overrightarrow{OM} = r\cos\theta\,\vec{i} + r\sin\theta\,\vec{j}$

Or $\overrightarrow{OM} = r\,\vec{e_r}$, par conséquent $\vec{e_r} = \cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}$

$$\vec{V} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \ldots$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \ldots$$

On voit que l'accélération est dirigée vers le point O: elle est opposée au vecteur position.

Force centrifuge

Chaque fois qu'un objet décrit un mouvement circulaire et qu'il reste sur sa trajectoire, il sera soumis à la fois à :

- La force centripète (ou radiale) $\vec{F}_r$ est parallèle à $\vec{a}$,
- La force centrifuge $\vec{F}_c$ est opposée à $\vec{a}$.

$$F_c = F_r = m\,\omega^2\,r$$

III- Centrifugation

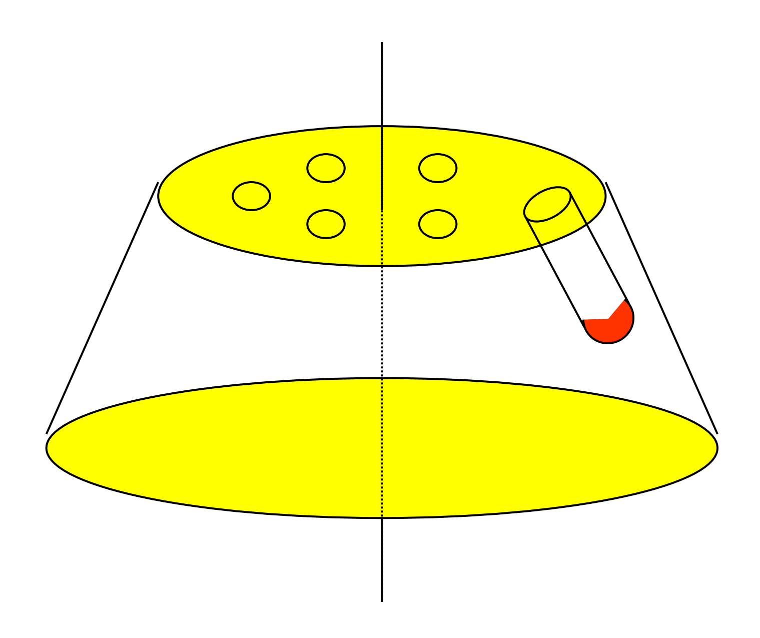
- C'est une des applications les plus intéressantes de la force centrifuge.
- Sous l'effet du poids effectif, une particule peut se sédimenter au fond d'un tube à condition que sa masse volumique soit supérieure à celle du liquide où elle se trouve.
- Rappelons que $P_{eff.}$ est inférieure à mg.

- Si on incline le tube à la position horizontale, et qu'on le fasse tourner, les particules présentes dans le liquide vont subir la force centrifuge et se dirigeront au fond du tube: c'est la sédimentation sous l'effet de F_c.
- Cette force peut être 10^6 fois plus grande que $P_{eff.}$.Elle dépend principalement de la vitesse de rotation.

C'est le principe physique de la centrifugeuse.

Schéma d'une centrifugeuse

- **Un tube placé dans une centrifugeuse**



- Les centrifugeuses sont utilisées dans plusieurs domaines :

  a- l'isolement des globules rouges du sérum,

  b- la séparation des précipités ou de bactéries,

  c- la séparation des matières grasses (le beurre du lait par exemple)

  d- la sédimentation des molécules protéiques.

  e- Si la solution contient plusieurs types de particules, elles seront identifier grâce à leurs vitesses de sédimentation qui dépend de leur masse. Ainsi, on pourra identifier les différentes composantes du mélange (solutions biologiques...).

III- Mouvement circulaire non uniforme

- C'est un mouvement dont la trajectoire est un cercle (ou un arc de cercle), mais le module du vecteur vitesse n'est pas constant. ($dV/dt \neq 0$)
- Il apparaîtra alors une 2 ème accélération appelée accélération tangentielle a_t: $a_t = dV/dt$

Le vecteur accélération du mouvement sera donné par:

$$\vec{a} = \vec{a_t} + \vec{a_r}$$

Où $a_r = V^2/r$

et $a_t = dV/dt = r\, d\omega/dt = r\, a_{ang}$

$a_{ang} = d\omega/dt$ est appelée accélération angulaire.

B- MOUVEMENT OSCILLATOIRE

Bien que la nature physique de systèmes oscillants varie, les mêmes équations mathématiques décrivent leurs faibles oscillations autour de la position d'équilibre.

Exemple de mouvements oscillants :

- Mouvement du balancier d'une horloge,
- Mouvement des atomes dans un solide,
- Production de sons par les cordes vocales humaines,
- Courant alternatif (électricité),
- Ondes émises par un téléphone cellulaire

I/ Mouvement harmonique simple :

- Il est caractérisé par :

  - l'amplitude qui est la valeur maximale du déplacement par rapport à la position d'équilibre ;

  - la période qui est le temps nécessaire pour faire un aller-retour (une oscillation complète).

Equation du mouvement harmonique

- Le mouvement est dit harmonique si :

$$\vec{a} = -\omega^2 \vec{OM}$$

$$\Leftrightarrow \quad d^2(\vec{OM})/dt^2 + \omega^2 \vec{OM} = \vec{0}$$

- ω est lié à la période T par:

$T = 2\pi/\omega$ et T est en s.

- Quant à la fréquence f, elle est donnée par le nombre d'oscillations par seconde.

$f = 1/T$ et f est en Hz.

- Si l'onde a une vitesse V, la longueur d'onde λ est donnée par

$\lambda = V\,T$ et λ est en m.

Loi de Hooke à une dimension:

$$F = -\,k\,x$$

F est la force de rappel (en N)

k est la constante du ressort ou raideur du ressort (en N/m)

Si K faible: le ressort est mou.

x est le déplacement de l'objet à partir de la position d'équilibre. x est en valeur algébrique.

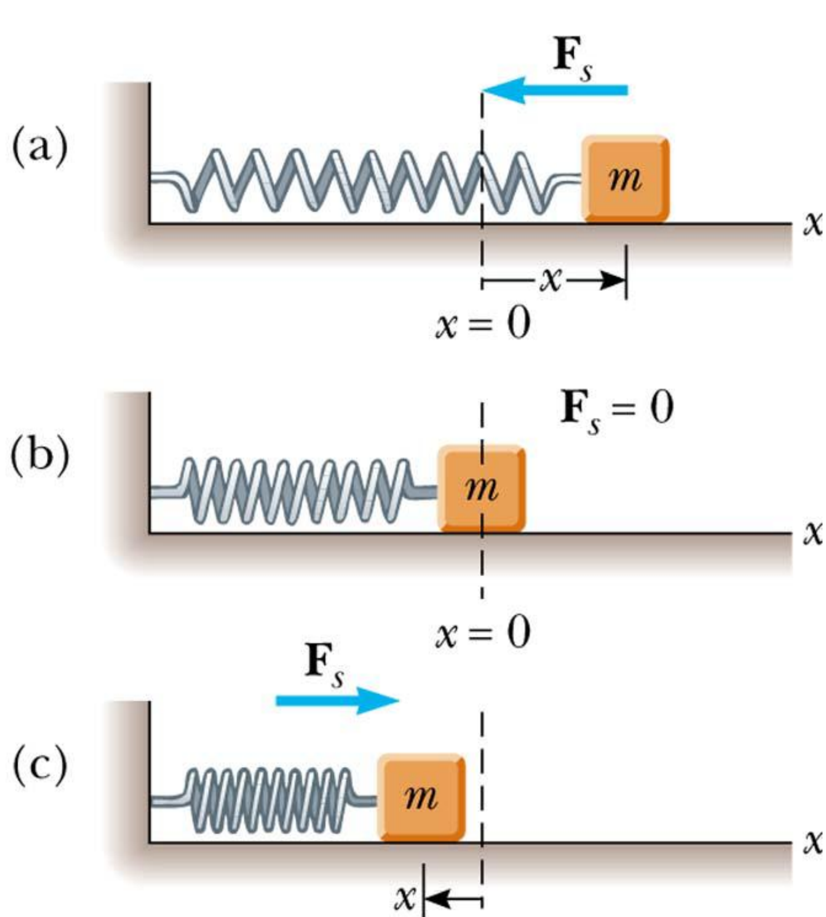
Signe négatif: force est toujours de sens opposé au déplacement (force de rappel)

Loi de Hooke appliquée au système masse – ressort

Quand x est positif → ,
F est négative ← ;

A l'équilibre (x=0), F = 0 ;

Quand x est négatif ← ,
F est positive → ;



Chapitre 4
Travail et énergie

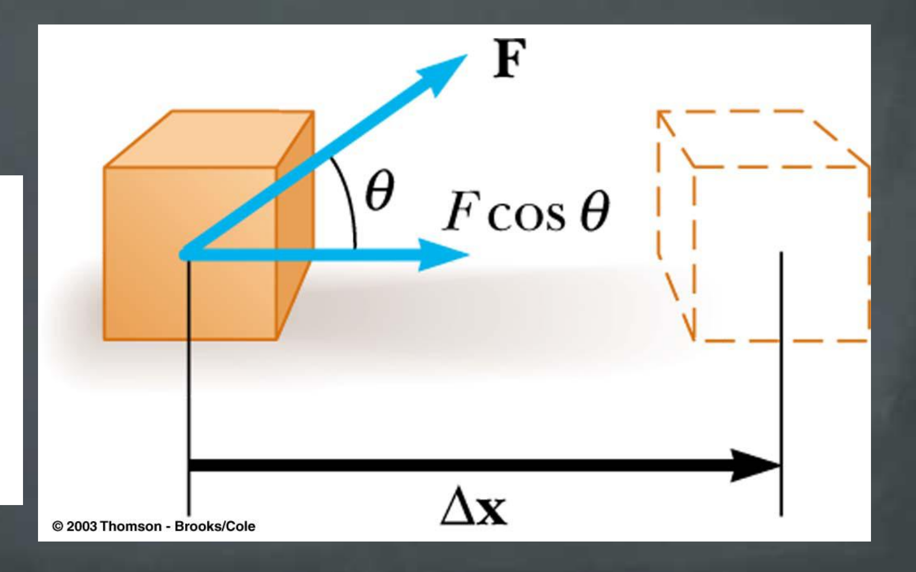
Pr. M. ABD-LEFDIL
Université Mohammed V-Agdal
Faculté des Sciences -Rabat
Département de Physique2011-12
SVT

Travail

- Relie la force au changement de la position.
- Dans le cas d'un foce constante:

$$W = \vec{F} \cdot (\vec{x}_f - \vec{x}_i)$$
$$= F \Delta x \cos\theta$$

W:Quantité Scalaire et indépendent du temps



Unité du travail

$$W = F\ x$$

SI unité = Joule

1 J = 1 N·m = 1 kg·m²/s²

Dans le cas d'un force non constante:

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{dx}$$

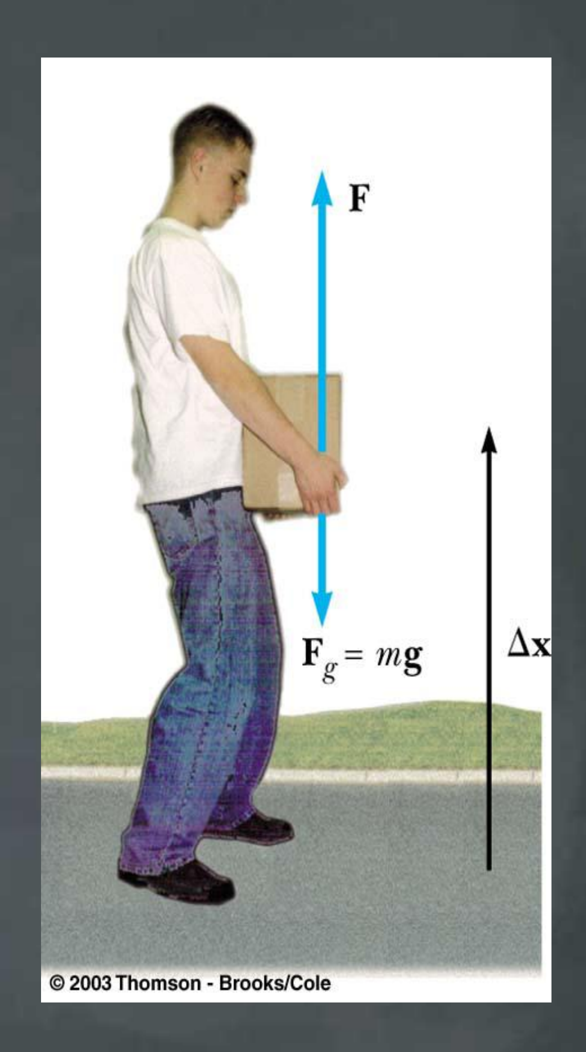
Et le travail total est donné par:

$$W = \int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \cdot \overrightarrow{dx}$$

Travail peut être positif ou négatif

- Il fournit W positif quand il soulève la boite.
- Il fournit un W négatif quand il abaisse la boite.

- Gravité fournit W positif quand la boite est abaissée.
- Gravité fournit W négatif quand la boite est soulevée



Energie Cinétique

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2$$

Même unité que W

D'après le chap. 1, on peut démontrer que:

$$v_f^2 - v_i^2 = 2a\Delta x$$

Multiplions les 2 membres par m/2,

$$\Delta E_C = \frac{1}{2}mv_f^2 \quad \frac{1}{2}mv_i^2 = ma \quad \Delta x$$

$$E_{C,f} \quad E_{C,i} = F\Delta x = W$$

Energie Potentielle

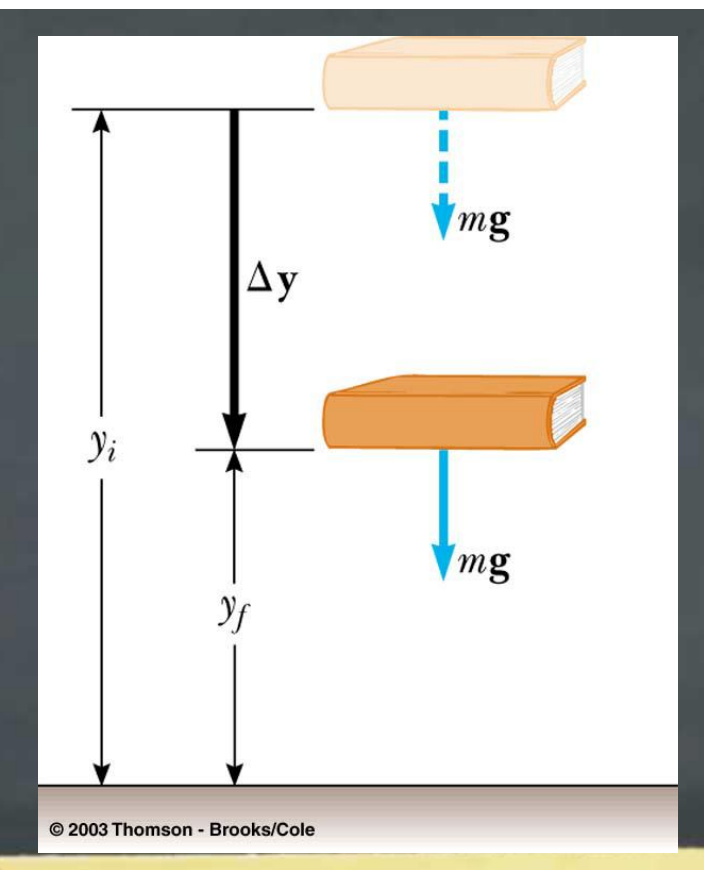
- Alors que l'énergie cinétique d'un objet est associée à sa vitesse, nous allons voir maintenant une autre forme d'énergie associée à la position et qu'on appelle énergie potentielle.
- Cette forme d'énergie existe seulement pour les forces dites conservatives.

Si la force dépend de la distance,

$$\Delta E_P = -F\,\Delta x \qquad \Delta E_p = -W$$

Pour la force de gravité (près de la surface de la terre)

$$\Delta E_P = mg\,h$$



Conservation de l'énergie

$$E_{P,f} + E_{C,f} = E_{P,i} + E_{C,i}$$

$$\Delta E_C = -\Delta E_P$$

Exemples de Forces Conservatives:

- Gravité, force électrostatique, force de rappel d'un ressort …

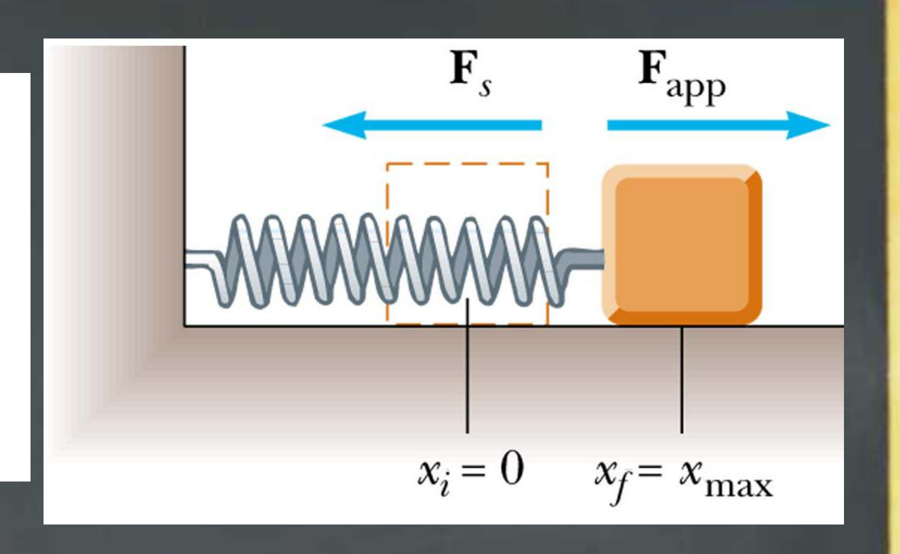
Forces Non-conservatives:

- Frottement, résistance de l'air …

Les forces non conservatives conservent l'énergie !

Energie est seulement transférée en énergie thermique

Ressorts (Loi de Hooke) revoir chap. 3



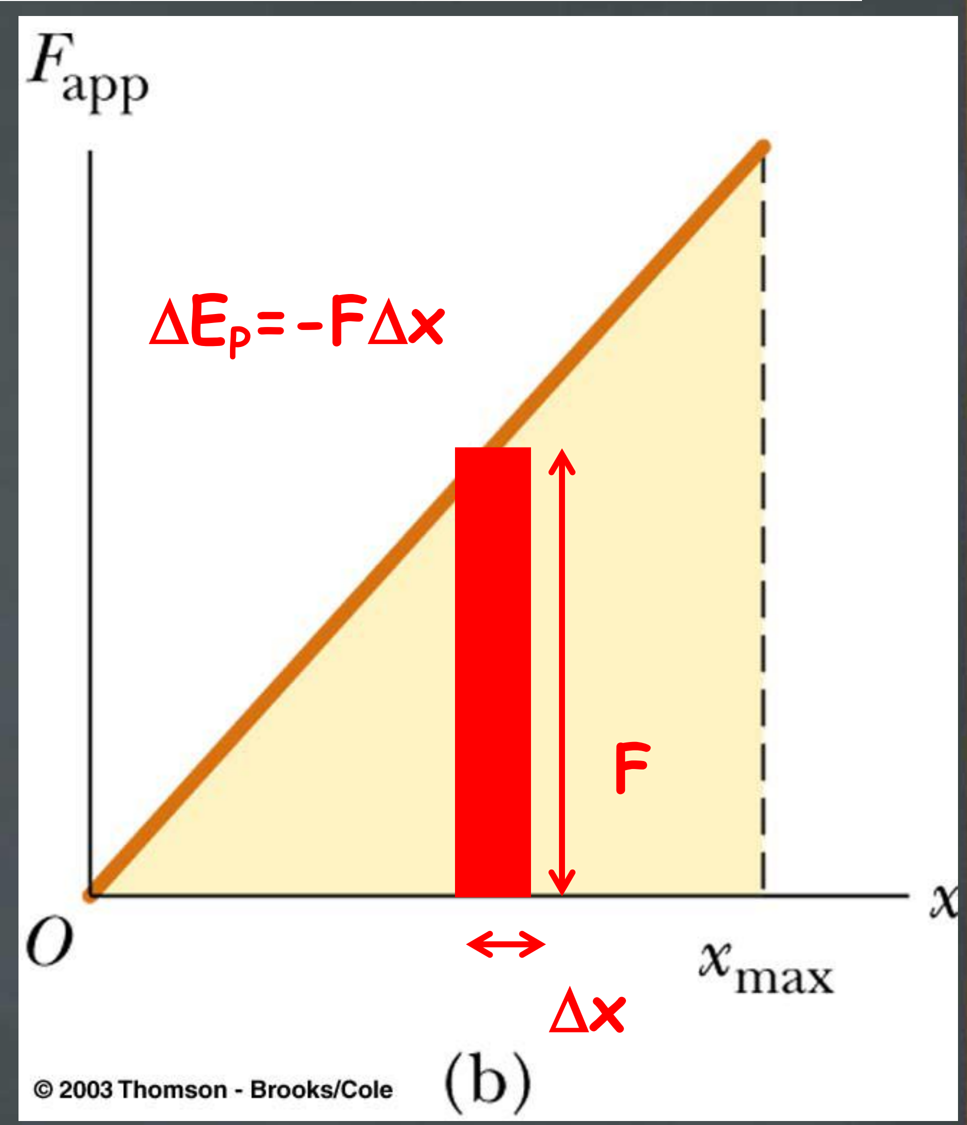
$$F = -kx$$

F est Proportionnelle au déplacement par rapport à l'équilibre.

Energie Potentielle du ressort

$$\sum \Delta E_P = \frac{1}{2}(kx)x$$

$$E_P = \frac{1}{2}kx^2$$



Puissance

- Puissance est le taux de transfert d'énérgie.

$$P = \frac{W}{t}$$

- Unité dans le SI est Watts (W)

$$1\ W = 1\ J/s = 1\ kg\,\frac{m^2}{s^3}$$

- Unité US est hp (horse power)

$$1\ hp = 746\ W$$

Autre expression de la Puissance

$$P = \frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{F \Delta x}{\Delta t}$$

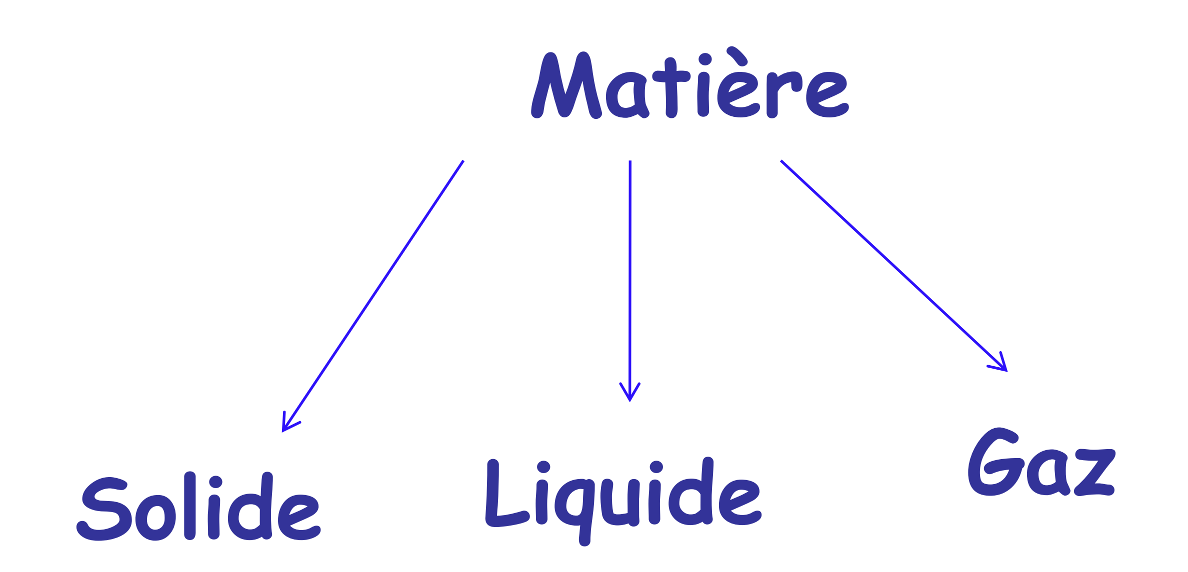
$$P = F\,v$$

Pour la même force, la puissance augmente avec la vitesse.

CHAPITRE 5

MECANIQUE DES FLUIDES

Pr. M. ABD-LEFDIL
Université Mohammed V- Agdal
Département de Physique
Année universitaire 2011-12
SVT



Caractéristiques de ces 3 états:
rigidité et cohésion

Rigidité ? capacité à conserver son volume sous l'effet d'une force.

Cohésion? capacité à conserver sa forme sous l'effet d'une force.

Un élément de matière sans cohésion est un fluide: le liquide et le gaz

Dans ce chapitre 5, nous allons étudier:

- les fluides au repos,

- les fluides en mouvement sans frottement qu'on appelle fluides parfaits ou non visqueux.

- les fluides en mouvement avec frottement qu'on appelle fluides visqueux.

- Les liquides sont pratiquement incompressibles (masse volumique est constante).

Exemple: Il faut une force de 10^9 N par m^2 de surface pour diminuer le volume de l'eau de 5%.

Une masse donnée du fluide n'a pas une forme fixe. Le fluide prend la forme du récipient utilisé.

Par conséquent, on utilisera les notions de masse volumique et de pression pour l'étude du mouvement ou l'état d'équilibre d'un fluide.

I- Définition de la pression

La pression est la force par unité de surface agissant Perpendiculairement à la surface A. (figures à compléter en cours)



Dans le S.I, la pression a pour unité le Pascal Pa: 1Pa= 1N/m^2.

$$P = \frac{F\cos\theta}{A} = \frac{F\cos\theta \ \ell}{A \ \ \ell} = \frac{\text{Travail W}}{\text{Volume V}}$$

- **P correspond à des N/m^2 ou J/m^3.**

<u>Unités de la pression</u> :

- **Dans le S.I, l'unité est le Pascal Pa.**
- **1 atm = 1.013 10^5 Pa**
- **1 atm = 760 mm Hg = 1 bar**
- **1 torr = 1 mm Hg = 0.133 KPa**

Pression et profondeur

w est le poids

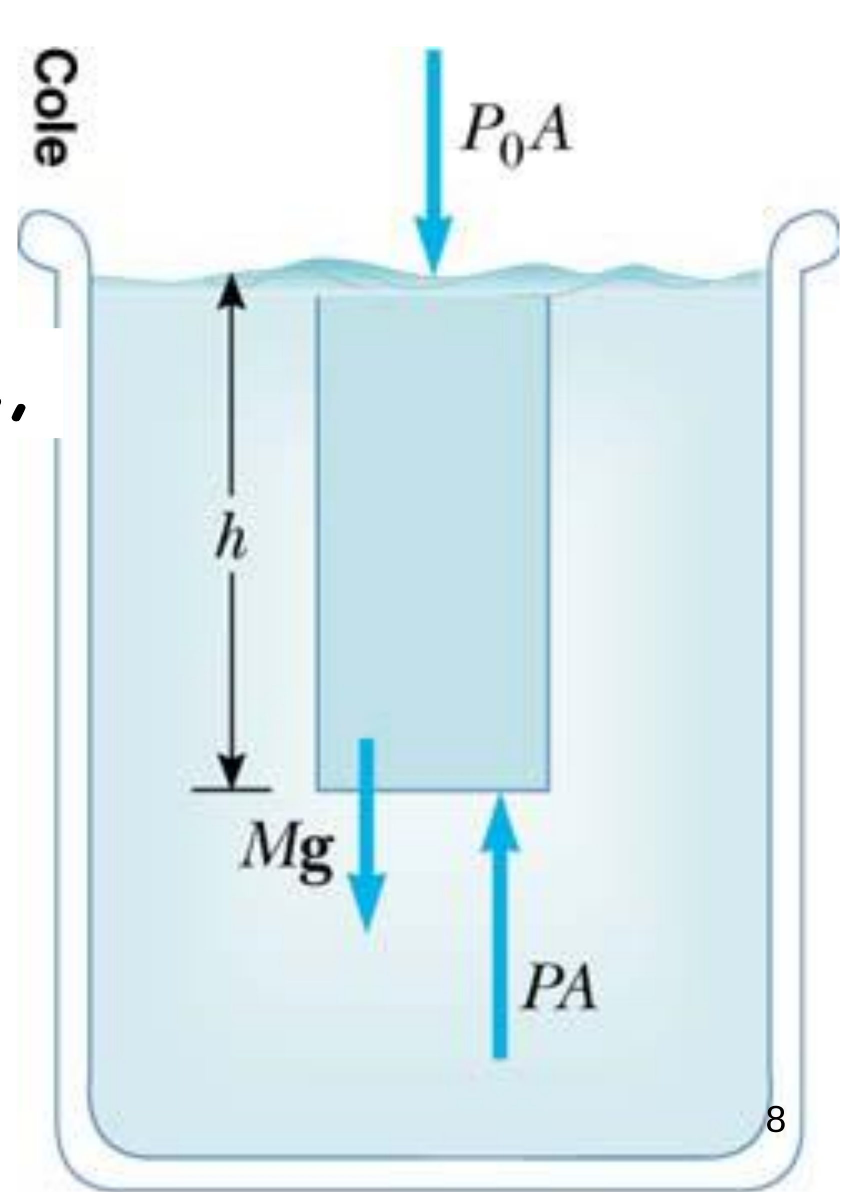
$$w = Mg = \rho V g = \rho A h g$$

Somme des forces est nulle,

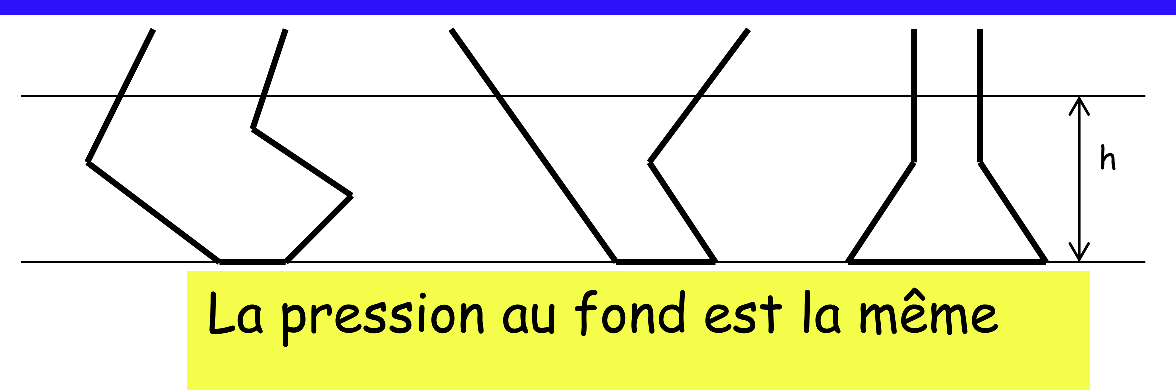
$$PA - P_0 A - w = 0$$

On simplifie par A

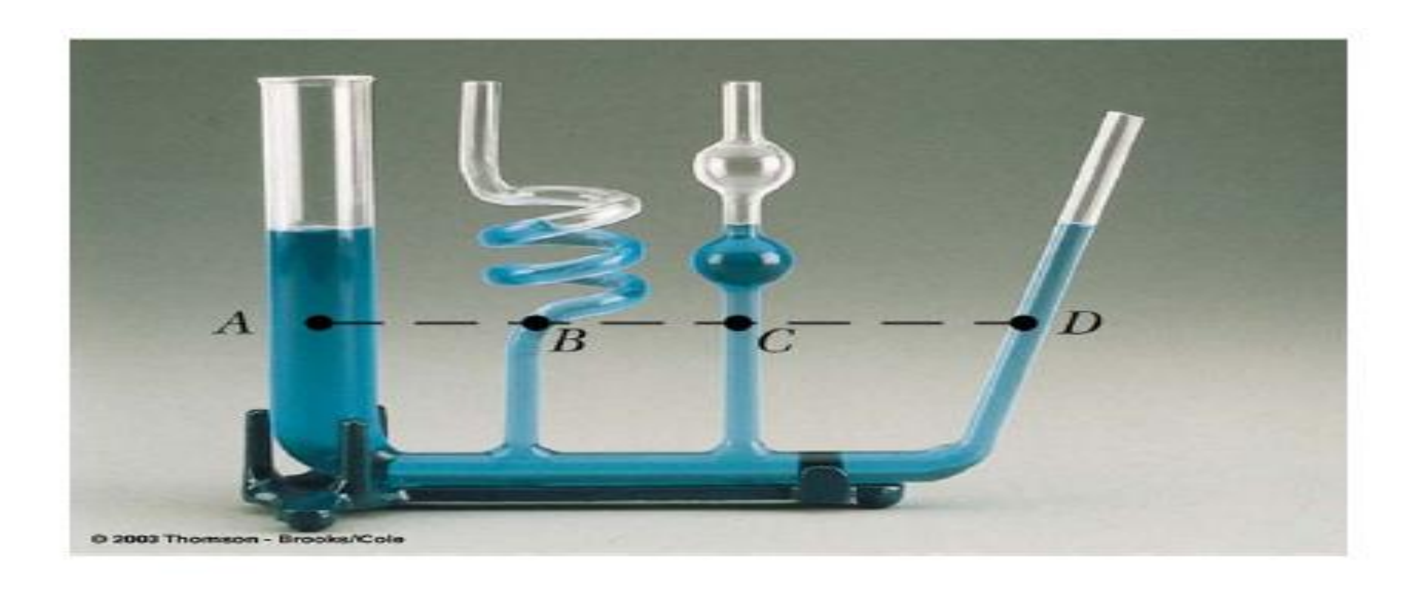
$$P = P_0 + \rho g h$$



- La pression au fond d'un récipient ne dépend pas de la forme du récipient mais uniquement de la hauteur du liquide.



La pression au fond est la même



II - Principe d'Archimède :



- La différence de pression entre le haut et le bas d'un objet placé dans un liquide engendre une poussée verticale dirigée vers les pressions décroissantes (de bas vers le haut). Elle est appelée poussée d'Archimède P_A.
- La poussée exercée sur un objet est égale au poids du fluide déplacé : C'est le principe d'Archimède.

$$P_A = \rho_0 \, V \, g \quad \text{(revoir chap. 2)}$$

V est le volume du fluide déplacé et ρ_0 la masse volumique de ce fluide.

III - Ecoulements :

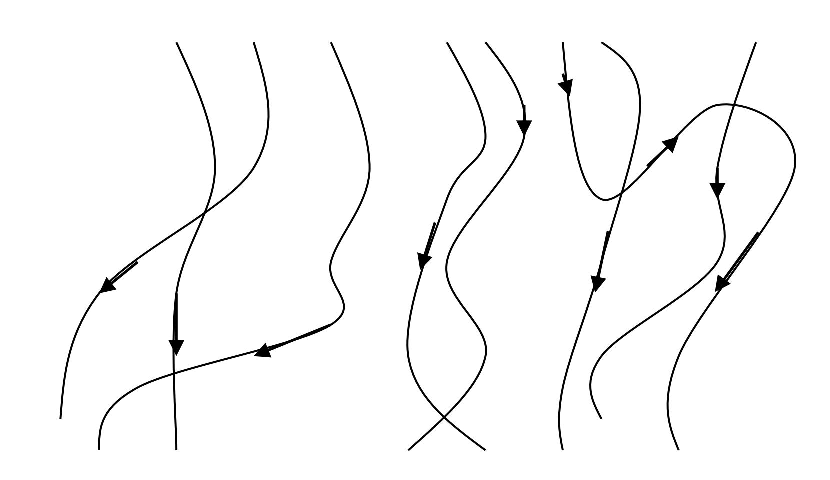
Un fluide peut présenter 2 types principaux d'écoulement :

- écoulement laminaire
- écoulement turbulent

1- Dans un écoulement **laminaire**, chaque particule suit alors une trajectoire uniforme qui ne croise pas celle d'aucune autre particule.

La vitesse du fluide en un point quelconque est tangente à cette ligne de courant.

2- A partir d'une certaine vitesse, l'écoulement devient **turbulent**. Ce dernier se caractérise par des lignes de courant qui tourbillonnent et s'entrecroisent.



On verra par la suite l'équation mathématique qui permet de définir la nature de l'écoulement (notion de nombre de Reynolds)



écoulement turbulent

écoulement laminaire

IV- Equation de continuité

- Considérons un fluide incompressible qui remplit totalement un conduit (un tube ou une artère par exemple).

- Si une masse supplémentaire pénètre à l'une des 2 extrémités, une masse identique en sort à cause du caractère incompressible du fluide. Ce principe simple est régi par l'équation de continuité et exprime la conservation du débit.

- Un débit Q à travers une canalisation est défini par le volume du fluide qui la traverse par unité de temps. Q est en m^3/s.

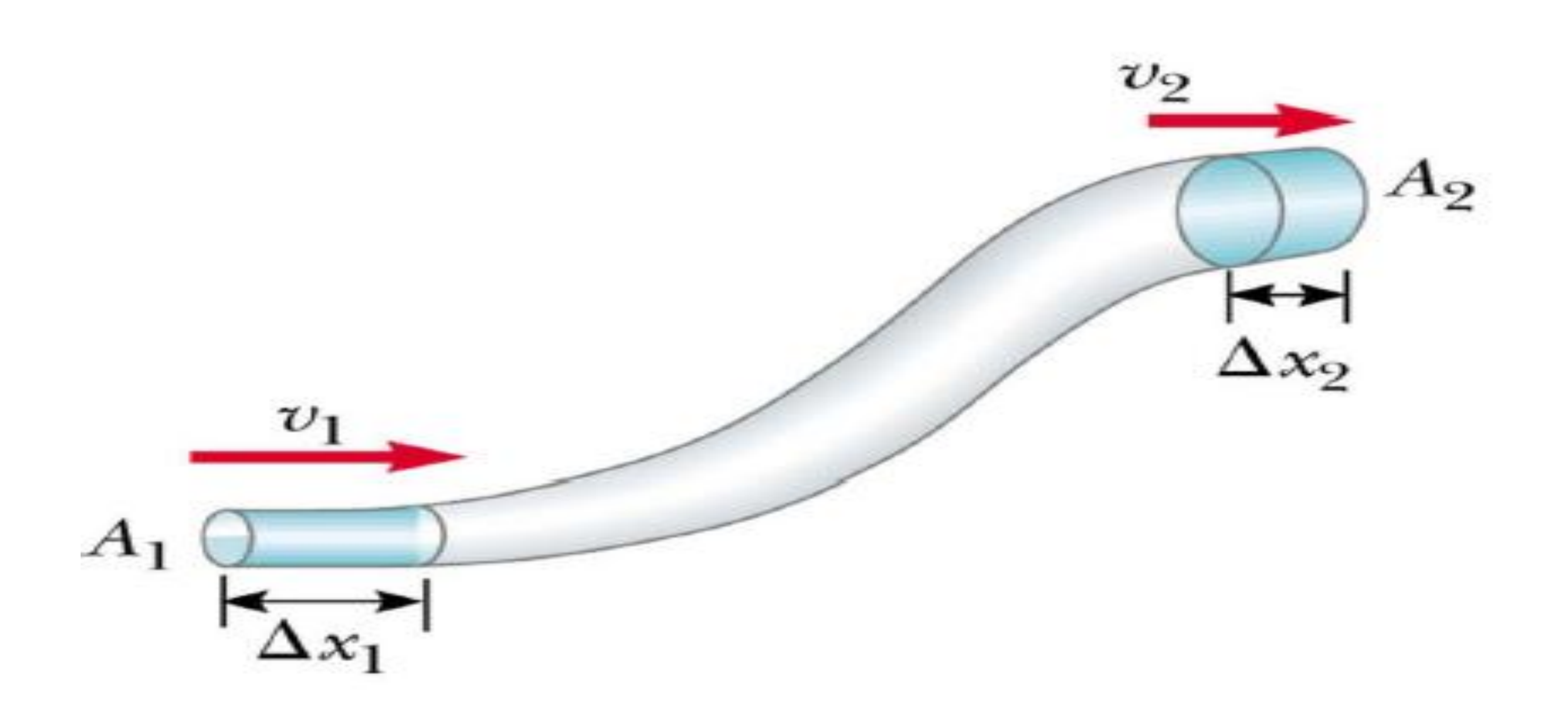
- L'équation de continuité : $Q_1 = Q_2$

Q_1 est le débit à l'entrée de la canalisation

Q_2 est le débit à la sortie de la canalisation

Considérons un tube de section A_1 à l'entrée et supposons que le fluide s'y déplace avec une vitesse moyenne v_1.

Dans l'autre extrémité de section A_2, la vitesse est v_2.



$$Q_1 = \frac{\Delta V_1}{\Delta t} \quad \text{et} \quad Q_2 = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

- Au bout de Δt, le volume du fluide $\Delta V_1 = A_1 \, \Delta x_1$ ou encore $\Delta V_1 = A_1 \, v_1 \, \Delta t$, s'est déplacé à l'entrée d'une distance $\Delta x_1 = v_1 \, \Delta t$.
- Le volume du fluide quittant le tube est $\Delta V_2 = A_2 \, \Delta x_2$ ou encore $\Delta V_2 = A_2 \, v_2 \, \Delta t$. Or $\Delta V_1 = \Delta V_2$ (ce qui entre= ce qui sort) ou encore $Q_1 = Q_2$, d'où :

$$A_1 \, v_1 = A_2 \, v_2$$

- Le débit d'un fluide est égal au produit de sa vitesse par la section du conduit (canalisation, tube, artère,...).

$$Q = A\,v$$

- Le produit de la section *A* du conduit par la vitesse du fluide est constant :

$$A\,v = Cte$$

C'est l'équation de continuité

V- Théorème de Bernoulli :

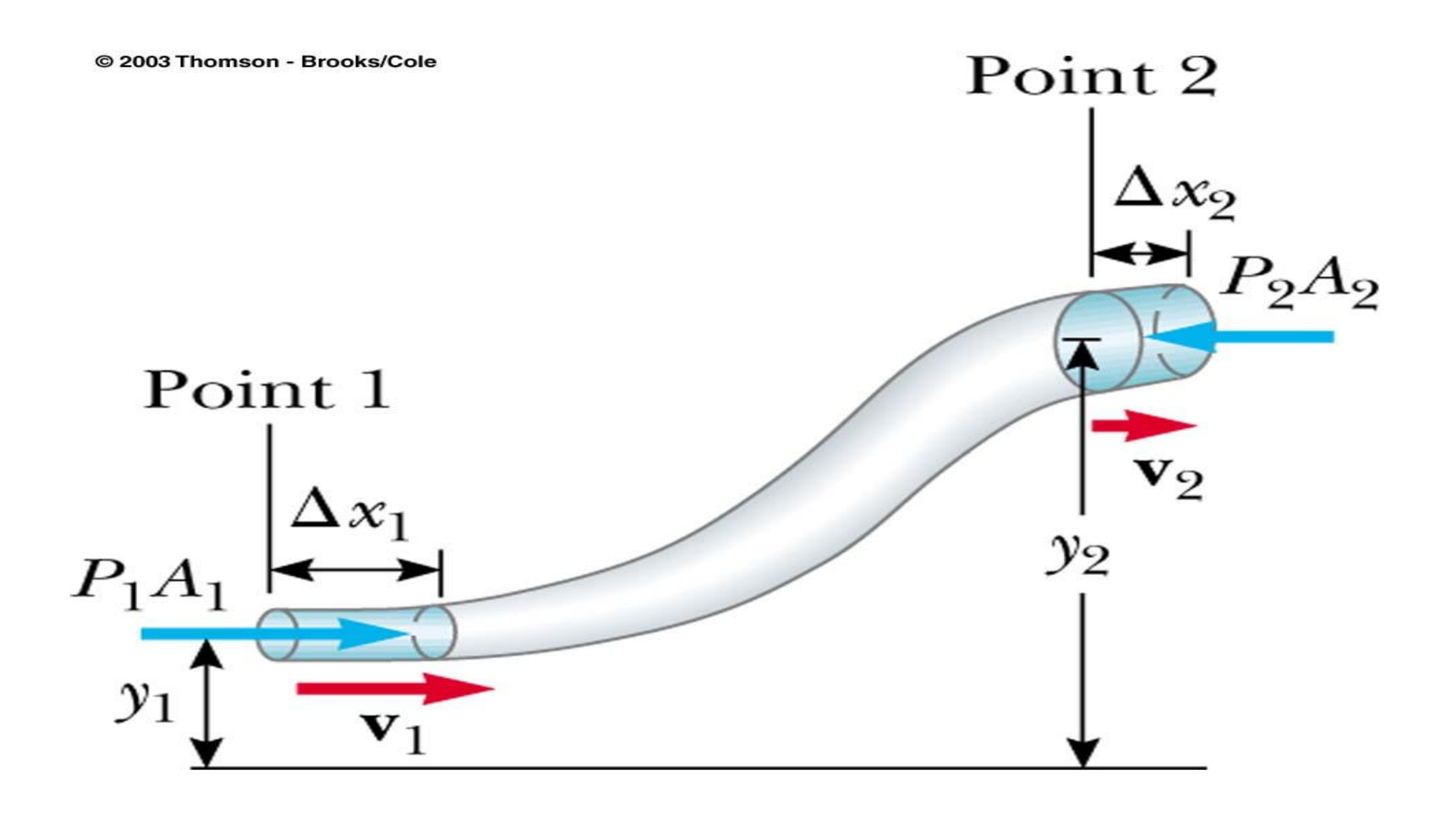
- - Pourquoi les pressions du sang sont différentes au niveau du cerveau, du cœur et des pieds par exemple?
- - Comment l'air circule-t-il dans un terrier?
- - Pourquoi la fumée s'élève-t-elle dans une cheminée?
- - Comment déterminer la hauteur à laquelle l'eau peut monter dans les canalisations d'un immeuble?

Le théorème de Bernoulli nous donne une explication à ces questions.

Conditions de validité du th. de Bernoulli:

- i- Le fluide est incompressible (ρ reste constante).
- ii - Le fluide est dépourvu de frottement ou le fluide est non visqueux ou parfait.
- iii - Le fluide est régulier (régime stationnaire) ou le fluide a une vitesse qui ne change pas au cours du temps.

Considérons un fluide dans une portion de tube de courant de section droite variable.



Equation de Bernoulli: démonstration

Considérons un volume V de masse M,

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} M v_2^2 \qquad \frac{1}{2} M v_1^2$$

$$= \frac{1}{2} \rho V\, v_2^2 \qquad \frac{1}{2} \rho V\, v_1^2$$

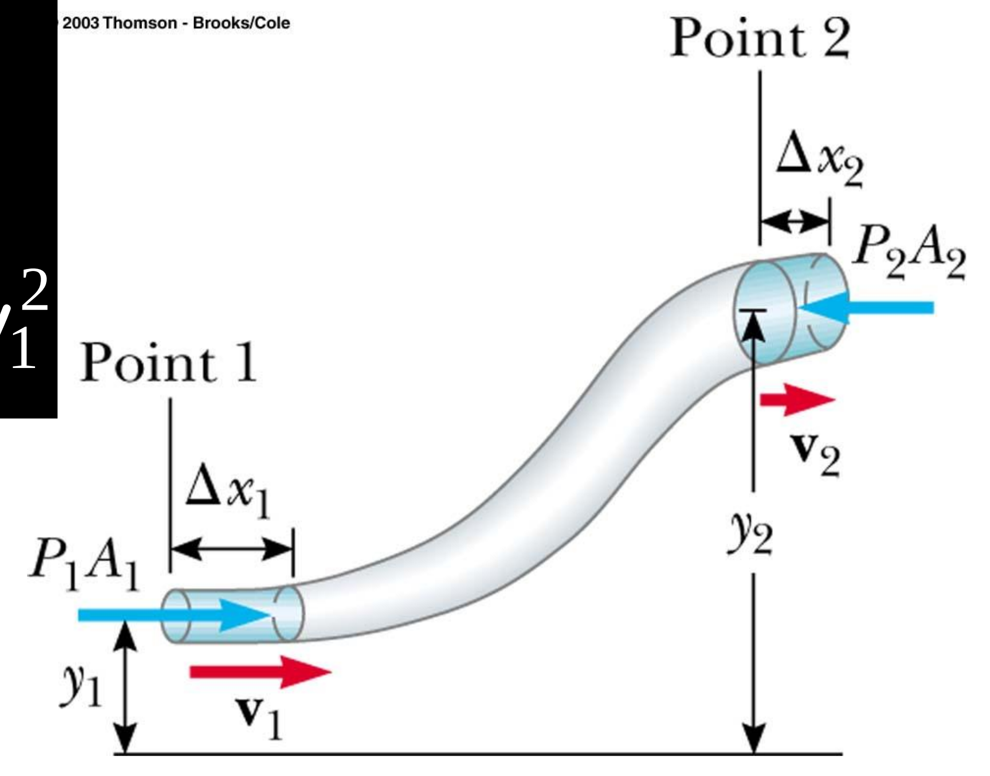
$$\Delta E_P = Mg\, y_2 - Mg\, y_1$$

$$= \rho V\, g\, y_2 - \rho V\, g\, y_1$$

$$W = F_1 \Delta x_1 \qquad F_2 \Delta x_2$$

$$= P_1 A_1 \Delta x_1 \qquad P_2 A_2 \Delta x_2$$

$$= P_1 V - P_2 V$$



On obtient alors:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

La somme de la pression et de l'énergie mécanique par unité de volume reste constante tout au long du tube de courant. C'est le théorème de Bernoulli.

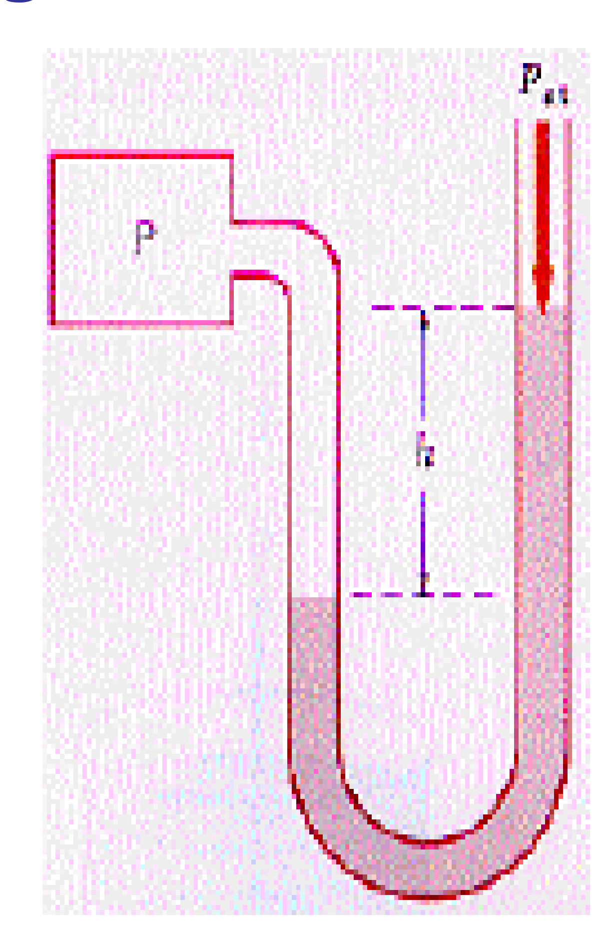
$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = cte$$

Equation à retenir !!!

• 1- **Manomètre** :

C'est un tube en U contenant un liquide (généralement le mercure Hg) et qui sert à mesurer la pression d'un gaz.

Manomètre à tube ouvert



- Appliquons le théorème de Bernoulli au cas du manomètre à tube ouvert:

$$P_{gaz} + [\rho\ g\ y_1] = P_{atm} + [\rho\ g\ y_2]$$

$$P_{gaz} - P_{atm} = \rho\ g\ (y_2 - y_1) = \rho\ g\ h$$

La pression du gaz se ramène donc à la mesure de la différence des hauteurs dans le tube en U.

Remarques :

i) $P - P_{atm}$ est appelée **pression de jauge**.

ii) le tube en U peut aussi servir à mesurer la pression d'un liquide à condition que ce liquide ne se mélange pas à celui du manomètre.

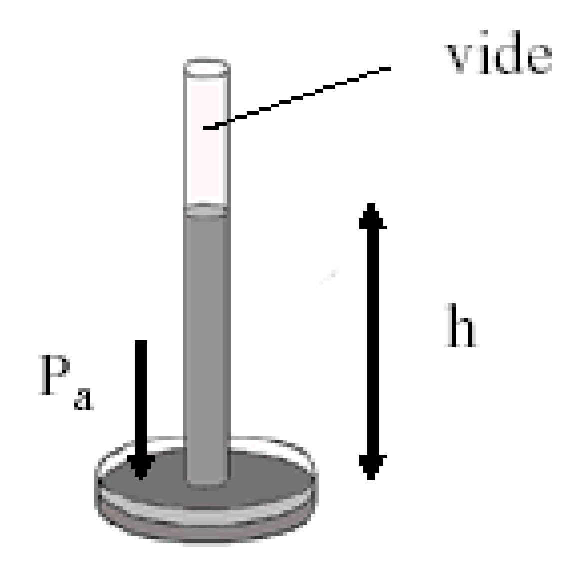
2- Expérience de Pascal :

Elle consiste en la mesure de la pression atmosphérique à l'aide d'un baromètre.

Baromètre

$P_a = \rho g h$

Ce dispositif mesure la pression atmosphérique



- Si on fait l'expérience avec le **mercure** (ρ = 13600 kg m^{-3}), on mesure:

h =

- Si on réalise cette expérience avec de **l'eau** (ρ = 1000 kg m^{-3}), on mesure:

h =

La pression ainsi mesurée est la pression atmosphérique :

$$P_{atm} = \rho\ g\ h$$

A.N.:

P_{atm} =13600 × 9,81 × 0.76 =1,013 10^5 Pa

P_{atm} =1000 × 9,81 × 10.33 = 1,013 10^5 Pa

3- Rôle de la gravitation dans la circulation sanguine:

Dans la positon debout, les pressions entre le cœur, les pieds et le cerveau sont forts différentes. Ceci reflète les grandes différences de niveau entre ces 3 points.

- Sachant que les effets de viscosité sont faibles, on peut utiliser le théorème de Bernoulli. En plus, les vitesses de circulation dans ces artères sont petites et sensiblement égales, d'où :

$$P_{cerveau} + [\rho\ g\ h_{cv}] = P_{coeur} + [\rho g h_c] = P_{pieds}$$

ρ(sang)= 1060 Kg m^{-3}.

g = 9.8 ms^{-2}.

Exemple pratique :

h_{cv} = 1.8 m et h_c = 1.3 m

$P_{pieds} - P_{coeur}$ = 13.5 KPa et

$P_{coeur} - P_{cerveau}$ = 4.1 KPa

Or : P_{coeur} = 100 mm Hg = 13.3 KPa

d'où : $P_{cerveau}$ = 62 mm Hg = 8.3 KPa

et P_{pieds} = 200 mm Hg = 26.6 KPa

Remarques

- Le cœur fournit, par rapport à la pression externe, une surpression de l'ordre de 13.3 KPa =100 mm Hg. C'est ce qu'on appelle la pression sanguine fournie par le cœur.

Pour mesurer e façon précise la pression artérielle, le patient doit être en position couchée.

- c) Sous l'effet d'une accélération, le sang est poussé dans le sens de l'accélération et va s'accumuler dans certains organes, par exemple les membres inférieures en position assise ou debout. En effet:

Appliquons le théorème de Bernouilli à une personne en présence d'une accélération **a** vers le haut (dans une fusée, un siège éjectable…):

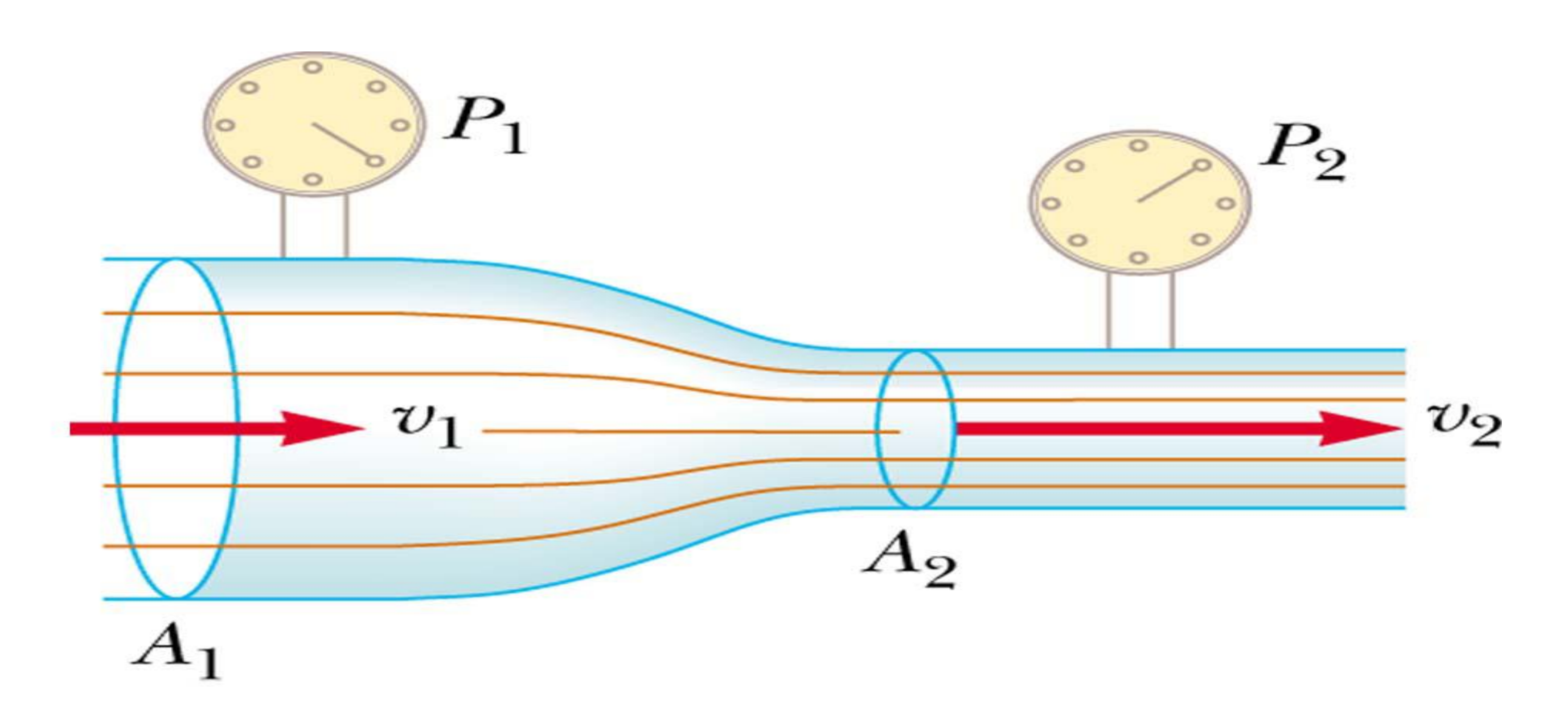
$$P_{cerveau} + [\rho\ (g+a)\ h_{cv}\ ] = P_{coeur} + [\rho\ (g+a)\ h_c]$$

$$P_{cerveau} = P_{coeur} + [\rho\ (g+a)\ (h_{cv} - h_c)\ ]$$

4- Tube de Venturi :

C'est un tube qui présente un rétrécissement (ou étranglement ou goulot).

- Cas d'un tube de Venturi horizontal :



Définition d’une sténose:
C’est un rétrécissement du calibre d'un vaisseau sanguin, et qui provoque une chute du débit sanguin en aval.

Définition d’un anévrisme:
C’ est une dilatation d'un vaisseau sanguin.
Un anévrisme est susceptible de se rompre, ce qui peut être à l'origine d'une hémorragie interne parfois fatale.

- L'équation de continuité nous donne :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Si $A_1 > A_2$, alors $v_2 > v_1$

En vertu du théorème de Bernoulli, la pression doit chuter à l'endroit de l'étranglement.

La chute de pression étant fonction de la vitesse d'écoulement. En pratique, sa mesure est réalisée au moyen d'étroites colonnes insérées dans le tube.

- Le théorème de Bernoulli donne (pour une même hauteur) :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho\, v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho\, v_2^2$$

Or : $v_2 = (A_1 / A_2)\, v_1$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\,(P_1 - P_2)}{\rho\,[(A_1^2 / A_2^2) - 1]}}$$

La mesure de $P_1 - P_2$ et la connaissance des aires A_1 et A_2 permettent de déterminer v_1, et par la suite v_2.

VI- Fluides visqueux

Observations expérimentales:

1- L'eau, l'huile et le miel coulent différemment: l'eau coule vite mais avec des tourbillons. Alors que le miel coule lentement mais de façon régulière.

2- La pression d'un fluide réel diminue tout au long d'un conduit dans lequel il s'écoule, même s'il est horizontal et de section uniforme.

Conclusions:

Dans un fluide réel, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent.

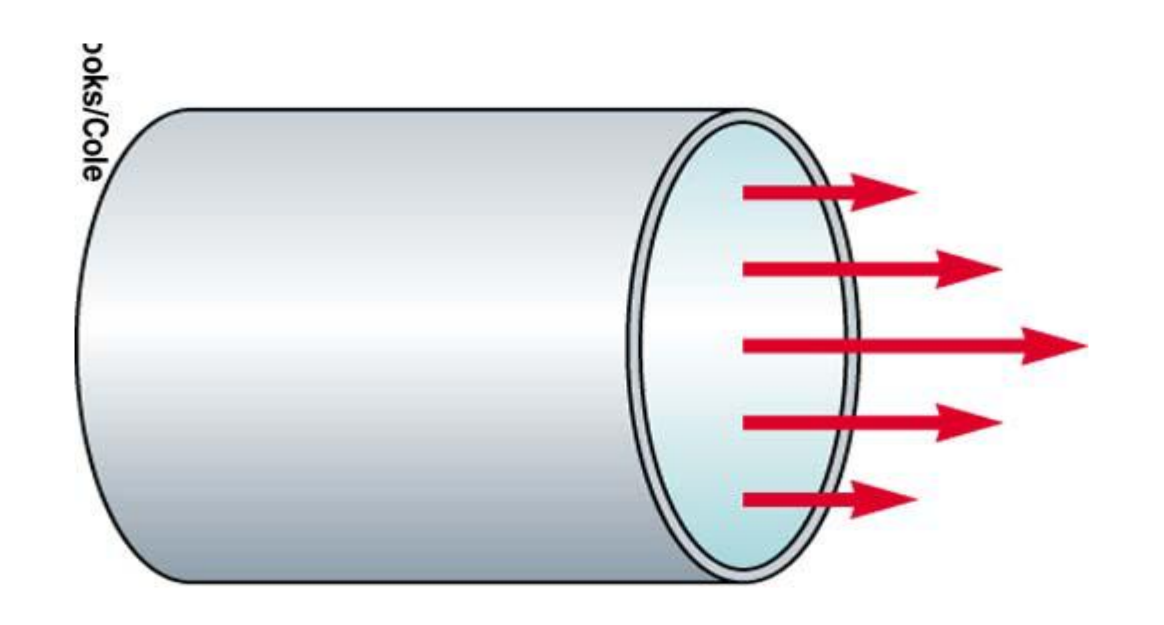
Les frottements qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres sont à l'origine de la viscosité.

Chaque fluide a sa viscosité.

1- VISCOSITE

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules du fluide et des forces d'interactions entre les molécules de fluide et celles de la paroi, les molécules du fluide ne s'écoulent pas à la même vitesse.

On dit qu'on a un profil de vitesses.

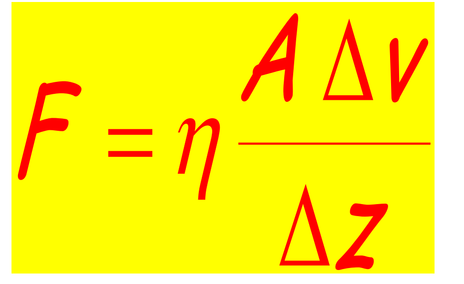


Dans la suite, on prendra une vitesse moyenne de ces différentes couches.

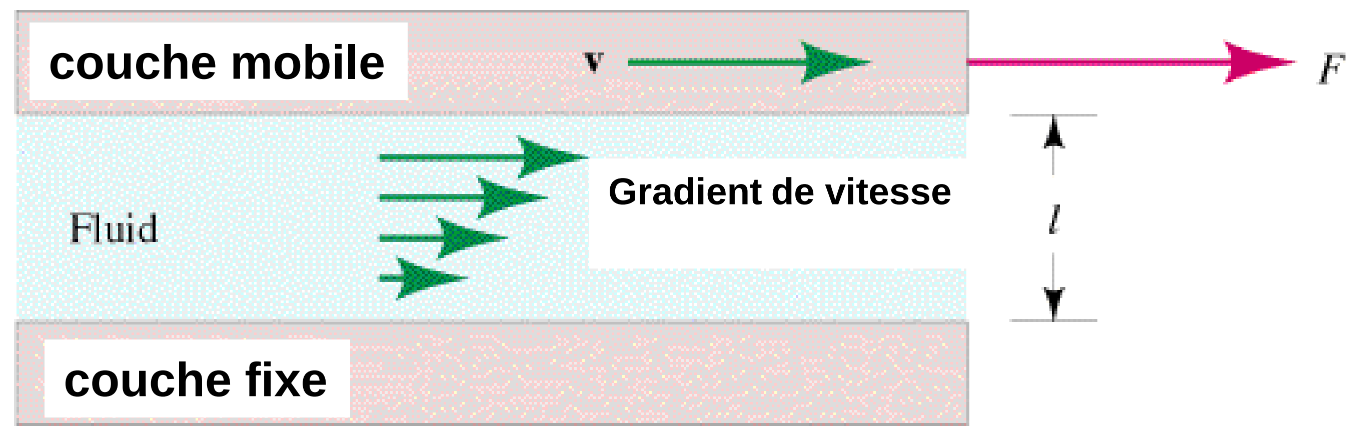
Définition de la viscosité

- Considérons 2 couches de fluide (qui se touchent) et distantes de Δz.

  La force F qui s'exerce à la surface de séparation de ces 2 couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre.
- F est proportionnelle à:
  - la différence de vitesse des couches soit ΔV,
  - la surface de la section A (ou S)
  - inversement proportionnelle à Δz.
- Le coefficient de proportionnalité noté η est appelé viscosité du fluide.



$$F = \eta \frac{A \, \Delta v}{\Delta z}$$



$$\Delta Z = \ell$$

ΔV= V (couche supérieure) – V (couche inférieure)
Si V (couche inférieure) = 0 : ΔV= V

$$F = \eta \frac{A\,V}{\ell}$$

Dans le système international, la viscosité s'exprime en Poiseuille (Pl).

1 Pl = 1 Pa.s = 1 kg m^{-1} s^{-1}.

Pour les liquides h baisse quand la température augmente.

- η (eau à 100°C) = 0.284 10^{-3} Pa.s ,

  η (eau à 37°C) = 0.6947 10^{-3} Pa.s
- η (sang à 37°C) =2.084 10^{-3} Pa.s ,

  η (sang à 20°C) = 3.015 10^{-3} Pa.s
- η (air à 20°C) = 1.730 10^{-5} Pa.s

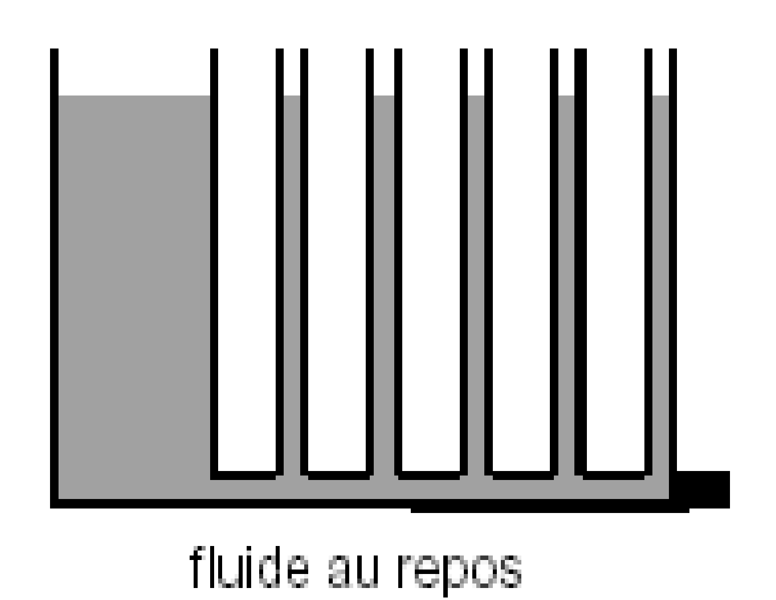
2- LOI DE POISEUILLE

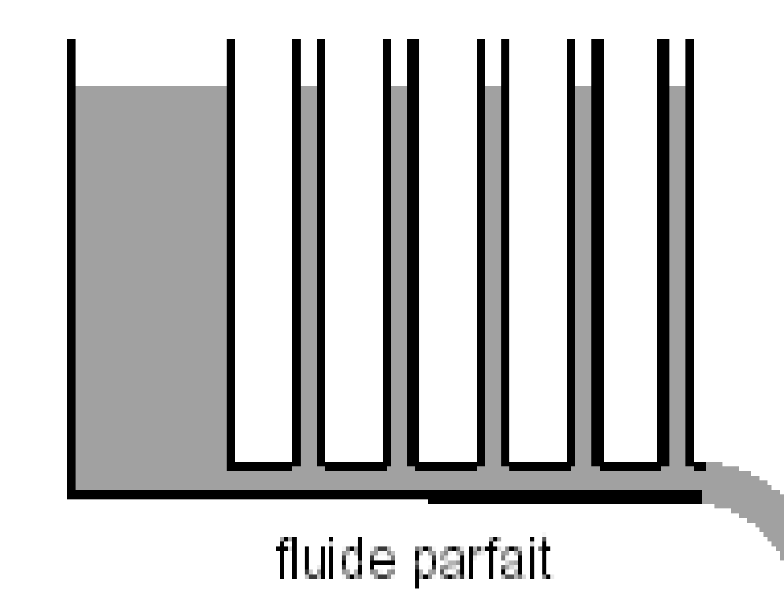
- Ecoulement d'un liquide dans une conduite horizontale :

un fluide s'écoule dans une conduite horizontale de section constante avec un débit déterminé, à l'aide d'un robinet par exemple.

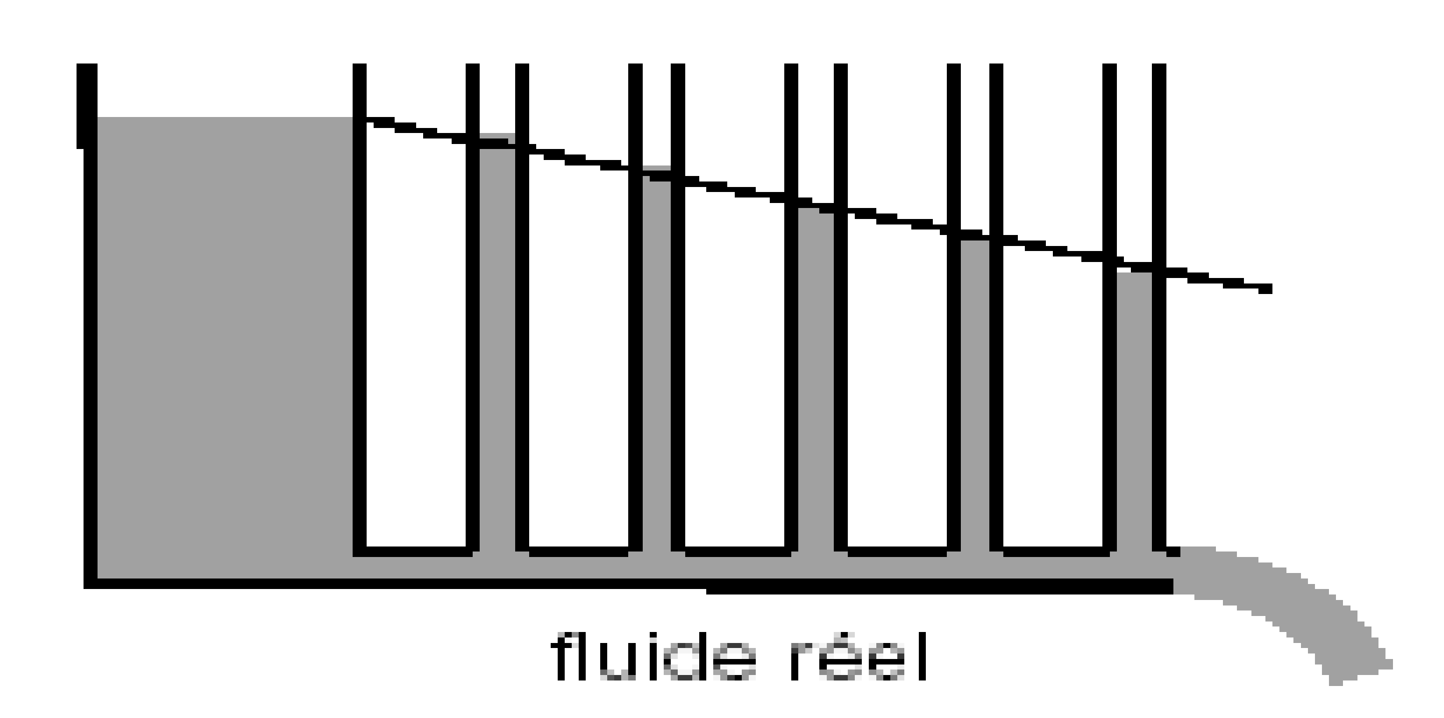
Des colonnes verticales placées régulièrement sur la conduite repèrent les pressions à différentes abscisses.

1- Si le liquide était parfait, on observerait une hauteur de liquide constante dans les colonnes manométriques comme pour un fluide au repos en accord avec le théorème de Bernouilli.


fluide au repos

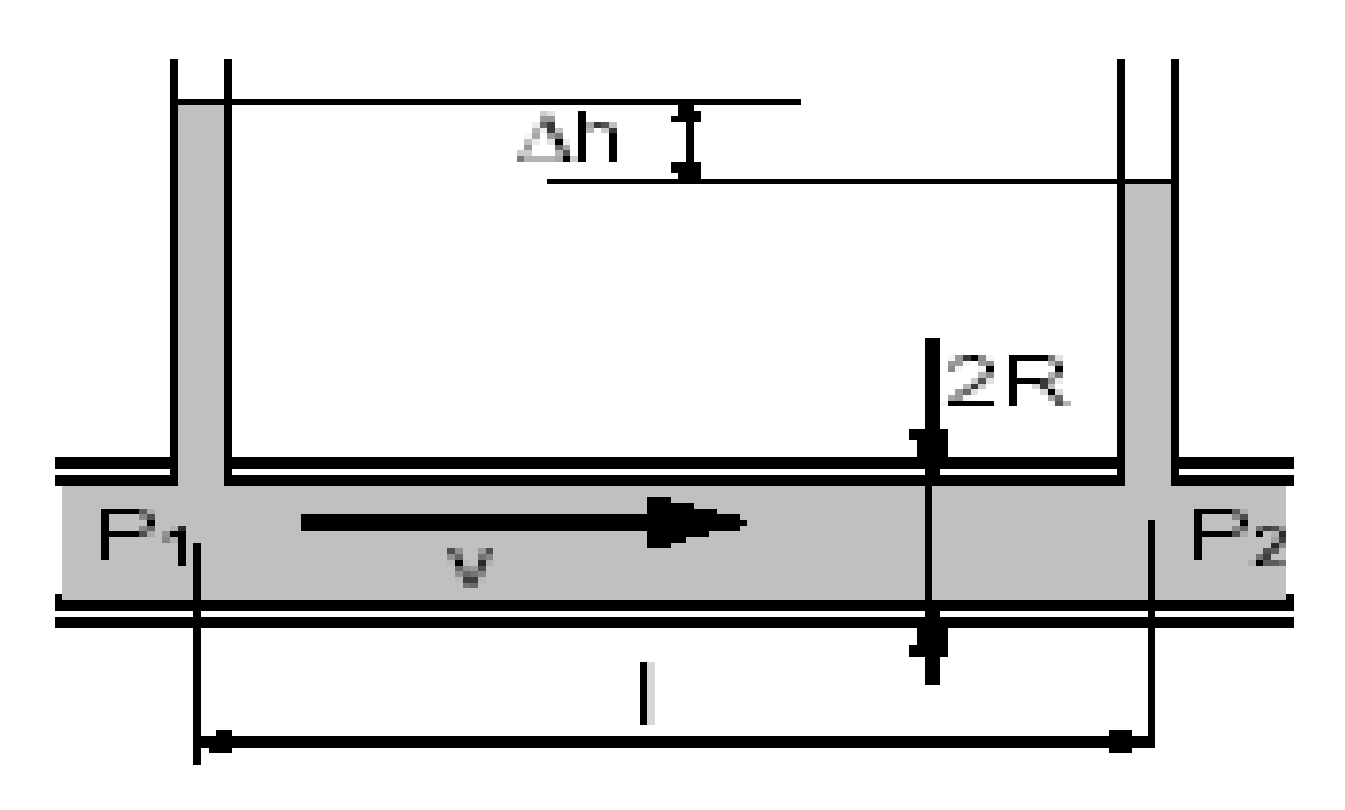

fluide parfait

2- Pour un liquide réel, on observe une diminution régulière de la pression tout au long de la conduite. On a alors une chute de pression.



• Loi de Poiseuille :

Soit un écoulement laminaire, dans une conduite cylindrique horizontale.



- On montre que le débit d'un fluide est donné par :

$$Q = \pi R^4 \frac{\Delta P}{8\,\eta\,\ell}$$

C'est la loi de Poiseuille

Q : débit en m^3/s et $\Delta P = P_1 - P_2$ en Pa

ℓ : longueur de la conduite en m

R : rayon intérieur de la conduite en m

η : viscosité du fluide en Pa.s

- On voit qu'une viscosité importante conduit à un débit faible. Alors qu'une faible variation du rayon des vaisseaux entraîne une forte variation du débit.

Exemple :

Quand le rayon d'un vaisseau sanguin augmente de 19% (R devient 1.19 R), le débit du sang est multiplié par 2.

3- Dissipation de l'énergie :

- La résultante des forces appliquées à une tranche de fluide dans un tube de section constante est égale à :

$$F = (F_1 - F_2) = (P_1 - P_2)\,A$$

où P_1 est la pression à l'entrée du tube, P_2 est la pression à la sortie et A la section du tube.

- La puissance moyenne nécessaire pour maintenir le régime permanent de l'écoulement est :

$$\mathcal{P} = F\ v_{moy} = (P_1 - P_2)\ A\ v_{moy}$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{P} = (P_1 - P_2)\ Q$$

Si l'écoulement se fait dans un tube cylindrique: $A = \pi R^2$

Alors :

$$\mathcal{P} = (P_1 - P_2)\ v_{moy}\ \pi R^2$$

4 - NOMBRE DE REYNOLDS :

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de 2 régimes d'écoulement : laminaire et turbulent

- **En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le rayon de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement était laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds et il est donné par :**

$$N_R = \frac{2\rho\, v_{moy}\, R}{\eta}$$

ρ est la masse volumique du fluide, V_{moy} sa vitesse et η sa viscosité. R est le rayon de la canalisation.

- L'expérience montre que :

- Si $N_R < 2000$: l'écoulement est laminaire.
- Si $2000 < N_R < 3000$: l'écoulement est intermédiaire.
- Si $N_R > 3000$: l'écoulement est turbulent.

Ces valeurs doivent être prises comme des ordres de grandeur.

Le passage d'un régime à un autre se fait de manière progressive.

Remarques :

- **a-** Le type d'écoulement est déterminé par une combinaison particulière de variables. Par exemple, la nature de l'écoulement ne changera pas si on double le rayon du tube tout en diminuant de moitié la vitesse du fluide.
- **b-** Dans l'écoulement turbulent, l'énergie est dissipée sous forme sonore (bruit) ou de chaleur.
- **c-** On parle de chute de pression ou encore de pertes de charge.

5- Résistance à l'écoulement :

La résistance à l'écoulement R_f (laminaire ou non) appelée en physiologie la résistance vasculaire est définie par le rapport de la perte de charge ΔP au débit Q :

$$R_f = \frac{\Delta P}{Q}$$

Dans le cas d'un écoulement laminaire dans un tube de rayon R et de longueur ℓ, on a :

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta \ell} \Leftrightarrow \frac{\Delta P}{Q} = R_f = \frac{8 \eta \ell}{\pi R^4}$$